

ITEP – Institut für Technische Physik

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung
Jahresbericht 2021



IMPRESSUM

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Technische Physik
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon +49 721/608-23501

www.itep.kit.edu

TEXTE

Tabea Arndt, Giovanni De Carne,
Christian Day, Thomas Giegerich,
Francesco Grilli, Jens Hänisch,
Bernhard Holzapfel, Frank Hornung,
Ingeborg Meyer, Mathias Noe,
Stylios Varoutis, Klaus Weiss,
Michael Wolf

FOTOS UND GRAFIKEN:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

TITELBILD:

Blick in die Anlage HERMESplus auf das
Wasserstoffplasma an einer zylindrischen,
auf 900 °C geheizten Superpermeations-
folie aus Niob (rechts im Bild)

GESTALTUNG:

modus: medien+kommunikation gmbh
www.modus-media.de

DRUCK:

Systemedia GmbH, 75449 Wurmberg

Gedruckt auf 100 Prozent
Recyclingpapier mit dem Gütesiegel
„Der Blaue Engel“

April 2022



BG-zertifiziert nach NLF / ILO-OSH 2001

Inhalt



4–5 VORWORT

6–39 ERGEBNISSE AUS DEN FORSCHUNGSBEREICHEN

- 6 Supraleiter- und Kryomaterialien
- 12 Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- 20 Supraleitende Magnettechnologie
- 30 Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

40–41 PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

42–43 ABGESCHLOSSENE DOKTORARBEITEN

- 42 Dr. Carl Bühler: Neue RRP Leiterkonzepte für verbessertes Pinning durch interne Oxidation
- 43 Dr. Shahab Karrari: Integration eines Schwungmassenspeichersystems in Niederspannungs-Verteilnetze

44–48 LEHRE UND BILDUNG

- 44 Vorlesungen, Seminare und Workshops
- 45 Betreute Doktorarbeiten
- 47 Betreute Masterarbeiten
- 48 Betreute Bachelorarbeiten

49–53 ZAHLEN UND DATEN

- 49 Organigramm
- 49 Personalstand
- 50 Personalveränderungen
- 51 Studentische Hilfskräfte
- 51 Gastwissenschaftler
- 52 Mitgliedschaften in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

54–62 VERÖFFENTLICHUNGEN

- 54 Fusion
- 56 Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)
- 59 Programm Energiesystemdesign (ESD)
- 60 Eingeladene Vorträge
- 61 Schutzrechtsbestände

63 KONTAKT

Vorwort

Das Institut für Technische Physik (ITEP) versteht sich als nationales und internationales Kompetenzzentrum für Fusions-, Supraleitungs- und Kryotechnologie mit folgenden Forschungsfeldern:

- Supraleiter- und Kryomaterialien
- Energietechnische Anwendungen der Supraleitung
- Supraleitende Magnettechnologie
- Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

Die Arbeiten des ITEP sind langfristig in den Programmen „Fusion“, „Materialien und Technologien für die Energiewende“, „Energiesystemdesign“ sowie „Materie und Universum“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren verankert.

Zur Bearbeitung seiner komplexen und meist multidisziplinären Aufgaben verfügt das ITEP über einzigartige große Versuchseinrichtungen, Labore und die entsprechende technische Infrastruktur, die ständig an die sich verändernden Anforderungen angepasst wird.

Dazu gehören:

- Labor zur Entwicklung supraleitender Komponenten für die Energietechnik
- Technikum zur Entwicklung supraleitender Materialien

- Magnetlabor zur Entwicklung von spezifischen supraleitenden Wicklungen und Magneten
- kryogenes Hochspannungslabor zur Untersuchung der Hochspannungsfestigkeit kryogener Isolierstoffe
- kryogene Materiallabore zur Untersuchung elektrischer und mechanischer Eigenschaften bei sehr tiefen Temperaturen

Auch im Jahr 2021 erzielte unser Institut beachtliche wissenschaftliche Ergebnisse, bearbeitete erfolgreich etliche Projekte und meisterte einige besondere Herausforderungen. Wir gehen im Folgenden genauer darauf ein.

Im Forschungsfeld **Supraleiter- und Kryomaterialien** liegt ein wichtiger Schwerpunkt auf der Erforschung neuer Supraleiter. 2021 untersuchte das ITEP zusammen mit der Universität Nagoya die Pinningmechanismen an neuartigen NdFeAsO-Schichten. Dabei wurde die Bedeutung der Korngrenzen-Tripelpunkte für das Pinning aufgeklärt. Im Rahmen eines Verbundprojekts der Luftfahrtforschung zur Entwicklung von Hybridbauweisen für Hochleistungs-Elektromotoren wurden additiv gefertigte Materialien für den Einsatz bei kryogenen Elektromotoren in Flugzeugen im Wasserstoffumfeld thermophysikalisch umfassend charakterisiert. Weiterhin wurde im Rahmen einer neu

angelegten langjährigen Kooperation mit dem CERN die gesamte Pilotproduktion von Hochtemperatur-Supraleitern der Firma Bruker zum KIT transferiert. Damit können künftig forschungsspezifische Bandleiterarchitekturen in anwendungsrelevanten Längen gefertigt werden.

Im Forschungsfeld **Energietechnische Anwendungen der Supraleitung** wurde in einem Verbundprojekt zur Entwicklung einer supraleitenden Industriestromschiene mit einer Stromstärke von 200.000 A ein wichtiger Meilenstein erreicht. Ein Test mit zwei modularen Teilleitern mit je 20.000 A wurde erfolgreich durchgeführt. Im kryogenen Hochspannungslabor wurde am Beispiel einer 10 kV-Durchführung gezeigt, dass konventionelle RIS-Durchführungen für die Anwendung bei tiefen Temperaturen grundsätzlich tauglich sind. In einem weiteren Verbundprojekt zur Entwicklung eines äußerst kompakten 110 kV-500 MVA-Supraleiterkabels für die Innenstadt von München wurde das Kabelsystem genau elektromagnetisch und thermisch modelliert. Im Power-Hardware-in-the-Loop Labor des ITEP wurden ein 60 kW-Schwungmassenspeicher und eine 3,5 kW-Mikrogasturbine in Echtzeit modelliert; eine experimentelle Validierung wurde im Labor durchgeführt. Damit stehen für beide Komponenten höchst genaue echtzeitfähige Modelle zur Verfügung.

Eine wichtige Aufgabe im Forschungsfeld **Supraleitende Magnettechnologie** besteht in der Entwicklung hochtemperatur-supraleitender Magnete. Im Rahmen eines Verbundprojekts zur Entwicklung und zum Vergleich von Konzepten für vollsupraleitende Windkraftgeneratoren wurden Probespulen mit nur 2 mm breiten Supraleiterbändern konzipiert und grundlegend charakterisiert. Im Rahmen einer internationalen Kooperation zwischen der EU und China wurde eine hochtemperatur-supraleitende Leiterprobe des am ITEP patentierten Kreuzleiters im FBI-Labor mit einem Strom von 6 kA bei einer Temperatur von 4,2 K und einem Magnetfeld von 12 T erfolgreich getestet. Im Wickellabor des ITEP wurde eine robotische Wickeltechnik mit drei Mehrachsrobotern in Betrieb genommen, und erste Probespulen wurden gewickelt. Zukünftig ist im Wickellabor die Fertigung supraleitender 3D-Spulen geplant. Im Rahmen der Wasserstoffinitiative der Bundesregierung wurde ein großes Verbundprojekt zu Erzeugung, Transport, Speicherung und Nutzung von flüssigem Wasserstoff gestartet.

Im Forschungsfeld **Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs** entwickelt das ITEP grundlegend neue Vakuumtechnologien und Verfahren zur Tritiumextraktion und -rückgewinnung. Das Arbeitspaket „Tritium-Materie Injektion-Vakuum“ im neuen europäischen Fusionsprogramm

von 2021 bis 2027 startete unter der Leitung von Christian Day. Die Herstellung der Kryopumpen für die Fusionsanlage JT-60SA wurde an einen Industriepartner vergeben und wird vom ITEP weiter begleitet. Für den komplexen Divertor des Fusionsexperiments W7-X wurde eine vollständige strömungstechnische Simulation in einer angemessenen Rechenzeit durchgeführt. Im Forschungsthema Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation wurden umfangreiche Tests am Quecksilbertestpumpstand des ITEP durchgeführt; die Ergebnisse wurden zur Hochskalierung der Pumpleistung von DEMO verwendet. Die am Institut entwickelte Methode des Direct Internal Recycling für den Brennstoffkreislauf von DEMO wird nun auch im großen Maßstab aufgebaut. Dazu wurde die Direct Internal Recycling Development Platform Karlsruhe (DIPAK) vom Präsidium des KIT genehmigt. Diese Anlage baut zwei der drei Kreisläufe im Brennstoffkreislauf nach und enthält alle neuen Technologien wie Pelletinjektion, Metallfolienpumpen, Quecksilberpumpen und Temperaturwechselabsorption zur Isotopentrennung.

In der **Ausbildung** betreute das ITEP 2021 insgesamt 32 Doktorarbeiten sowie neun Master- und 13 Bachelorarbeiten.

Die Corona-Pandemie brachte auch im Jahr 2021 viele ungewöhnliche Herausforderungen mit sich. Daher möchten wir allen un-

seren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie allen Kooperationspartnern aus Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie herzlich dafür danken, dass sie Verständnis für die zahlreichen Einschränkungen aufgebracht und die erforderlichen Maßnahmen mit großer Umsicht mitgetragen haben. Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit im Jahr 2022 und wünschen Ihnen alles Gute!

Herzlichst

Ihre Institutsleitung



Mathias Noe

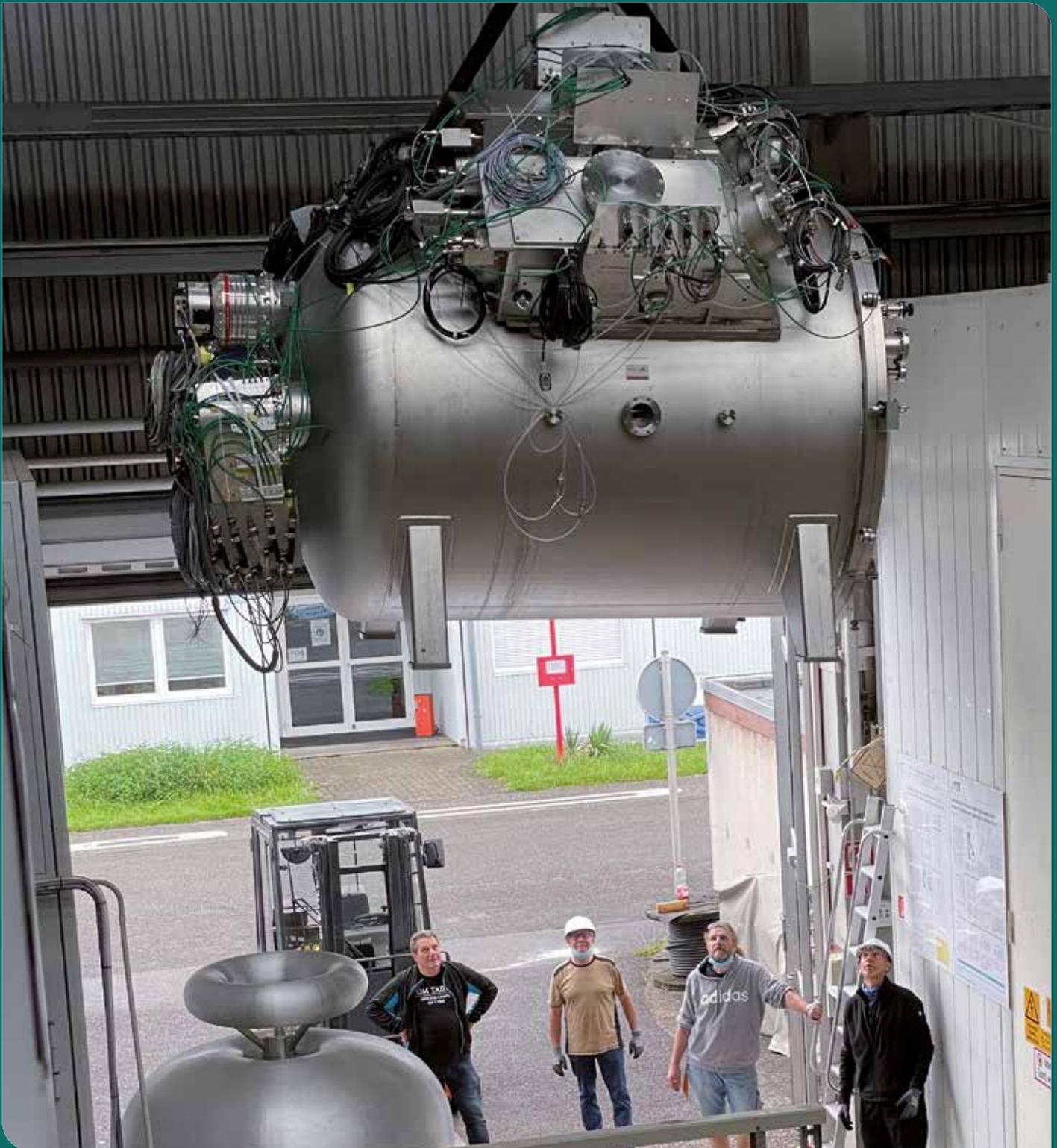


Bernhard Holzapfel



Tabea Arndt

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen



„Anlieferung von Komponenten der HTS R&D
Bandleiter Pilotproduktionsline im Rahmen der
beginnenden Kollaboration mit CERN“

Supraleiter- und Kryomaterialien

Koordination: Prof. Dr. Bernhard Holzapfel

Das Verständnis supraleitender Materialien und die Charakterisierung von Materialeigenschaften bei kryogenen Temperaturen sowie die Realisation von Leiterstrukturen bilden die Grundlage jeder supraleitenden Energie- oder Magnetanwendung. Daher bearbeitet das ITEP im Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien aktuell folgende Forschungsthemen:

- Supraleitende Materialien
- Leiter- und Kabeltechnologien
- Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryonanwendungen

SUPRALEITENDE MATERIALIEN

Zu den Schwerpunkten dieses Forschungsthemas gehören sowohl grundlegende festkörperphysikalische und materialwissenschaftliche Fragen, wie nach dem Verständnis und der Verbesserung der elektrischen Transporteigenschaften etablierter Supraleitermaterialien, als auch anwendungsorientierte Grundlagenuntersuchungen an neuen Supraleitern mit Anwendungspotenzial.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITER

Auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleiter wurden Untersuchungen zur Optimierung der chemischen Lösungsabscheidung und systematische Studien zur Seltenen Erde *RE* in $REBa_2Cu_3O_7$ -Verbindungen weitergeführt. Um die kritische Tempera-

tur T_c von TFA-MOD-gewachsenen $REBa_2Cu_3O_7$ -Dünnschichten zu optimieren, müssen mehrere Prozessparameter wie Kristallisationstemperatur, Sauerstoffpartialdruck, Gesamtdruck, Taupunkt und Verweilzeit angepasst werden.

Eine neue Methode im Bereich der statistischen Versuchsplanung (DOE) ist das Definitive Screening Design (DSD) [1], bei dem jeder Parameter auf drei Stufen – hoch, mittel, niedrig – festgelegt wird. DSD ermöglicht die Schätzung von Haupteffekten – der Effekt erster Ordnung eines einzelnen Faktors –, Zwei-Faktor-Interaktionen – die Korrelation zwischen zwei Faktoren – und quadratischen Effekten in einem linearen Modell, während die Anzahl der benötigten Experimente so weit wie möglich reduziert wird. Diese Methode wurde verwendet, um die kritische Temperatur für $ErBa_2Cu_3O_7$ -Dünnschichten auf CeO_2 -gepuffertem IBAD-Substrat zu optimieren (Abbildung 1).

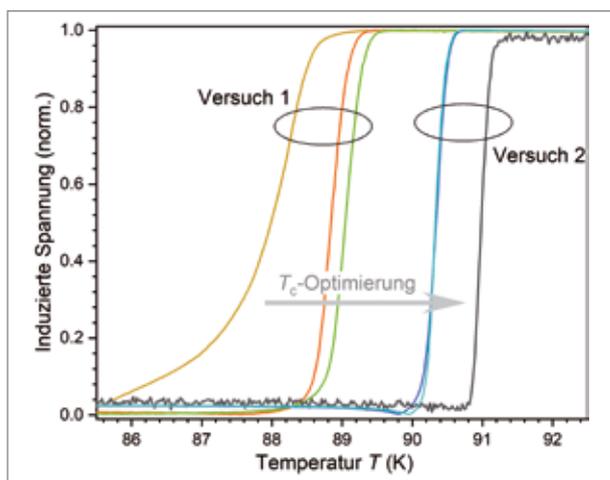


Abb. 1: Induktiv gemessener supraleitender Übergang mehrerer $ErBa_2Cu_3O_7$ -Dünnschichten auf CeO_2 -gepuffertem IBAD-Substrat während der DSD-Optimierung der kritischen Stromdichte.

$REBa_2Cu_3O_7$ -Schichten mit verschiedenen Seltenen Erden, sowohl *pristin* als auch mit $BaHfO_3$ -Nanopartikeln versetzt, wurden in statischen und gepulsten Hochfeldmagneten in Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen in Nagoya, Tohoku und Toulouse systematisch untersucht. Die Messungen der Anisotropie in der kritischen Stromdichte J_c hinsichtlich der Magnetfeldorientierung von $SrBa_2Cu_3O_7$ -Schichten in statischen Feldern bis 25 T setzten die 2020 vorgenommenen Arbeiten an $GdBa_2Cu_3O_7$ -Schichten [2] fort (Abbildung 2). Durch die ohnehin komplexe Mikrostruktur in $SrBa_2Cu_3O_7$ -Schichten haben, im Gegensatz zu anderen Seltenen Erden, interessanterweise die $BaHfO_3$ -Nanopartikel kaum einen Einfluss auf J_c . Die kritischen Felder von neun verschiedenen $REBa_2Cu_3O_7$ -Schichten wurden in der Rekordzeit von nur einer Woche in gepulsten Feldern bis 60 T resistiv bestimmt. Dafür wurde vorab nicht nur das Schichtwachstum für die entsprechenden Schichtsysteme mithilfe gepulster Laserdeposition und chemischer

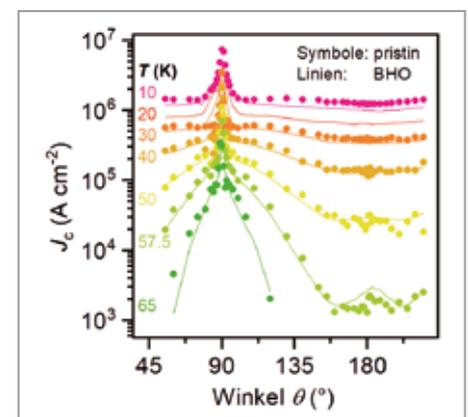


Abb. 2: Anisotropie der kritischen Stromdichte von $SrBa_2Cu_3O_7$, ohne (Punkte) und mit (Linien) $BaHfO_3$ -Nanopartikeln bei verschiedenen Temperaturen in einem Magnetfeld von 24 T.

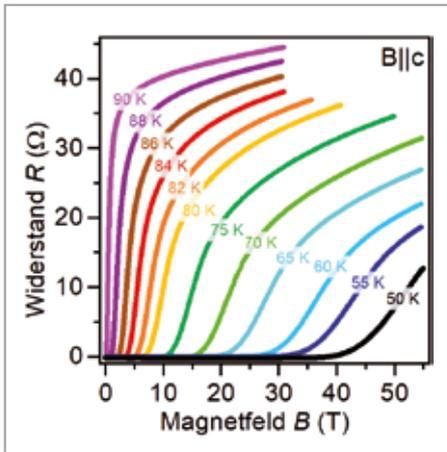


Abb. 3: Magnetfeldabhängigkeit des elektrischen Widerstands einer BaHfO₃-YBa₂Cu₃O₇-Nanokompositedünnschicht in Feldern bis zu 55 T.

Lösungsabscheidung optimiert; auch Strukturierung, Kontaktierung und Probenpräparation wurden verbessert. Mit RE = Sm, Dy und Ho wurden REBa₂Cu₃O₇-Systeme mit einer großen Bandbreite an RE-Ionengrößen gewählt, um diese mit dem ausgesprochen gut untersuchten YBa₂Cu₃O₇-System zu vergleichen (Abbildungen 3 und 4).

In Zusammenarbeit mit dem Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) am KIT Campus Süd wird Rastertransmissionselektronenmikroskopie (STEM) zur mikrostrukturellen Untersuchung solcher REBa₂Cu₃O₇-Dünnschichten angewendet, hier exemplarisch für eine pristine GdBa₂Cu₃O₇-Schicht gezeigt. Die Hochwinkelring-Dunkelfeld-STEM-Bildgebung (HAADF) zeigt direkt die atomare Struktur, da bei HAADF-STEM die Bildintensität direkt mit der mittleren Ordnungszahl korreliert und so schwerere Elemente heller erscheinen. So wurden plattenartige Ausscheidungen in GdBCO-Schichten zunächst bei mittlerer Vergrößerung in einer Querschnittsprobe lokalisiert (Abbildung 5a) und aufgrund der atomaren Struktur als Gd₂CuO₄ identifiziert (Abbildung 5b). Die Kristallstruktur von Gd₂CuO₄ ähnelt der von GdBCO, sodass die Fremdphase kohärent, also ohne die Bildung von weiteren Gitterdefekten, in der GdBCO-Schicht eingebaut ist. Die Gd-reichen (Ba-armen) Gd₂CuO₄-Ausscheidungen wurden zudem durch eine chemische Analyse mit der Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS) bestätigt (Abbildung 5c), da die Ausscheidungen ein erhöhtes/reduziertes Gd/Ba-Signal zeigen.

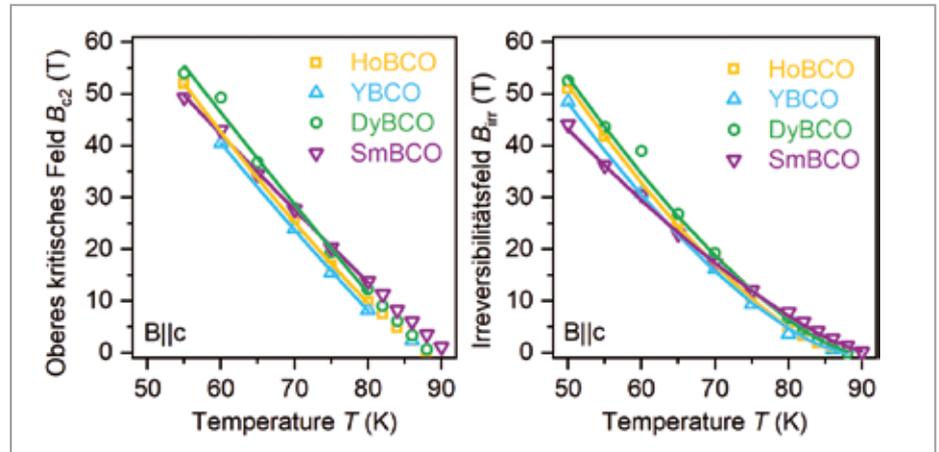


Abb. 4: Vergleich der oberen kritischen Felder B_{c2} (Mitte) und der Irreversibilitätsfelder B_{irr} (rechts) für verschiedene pristine REBa₂Cu₃O₇-Dünnschichten.

Die Periodizität von rund 1,2 nm der Gd- und Ba-Signale in GdBCO entspricht der Gitterkonstante in Wachrichtung.

Die Optimierung von REBa₂Cu₃O₇-Dünnschichten erfordert die Untersuchung vieler Fabrikationsparameter und STEM-Proben. Allerdings sind die Probenpräparation für STEM und die anschließende STEM-Untersuchung in unterschiedlichen Instrumenten zeitaufwendig. In modernen Rasterelektro-

nenmikroskopen (SEM) mit einer Ionenfeinstrahlanlage (FIB) können Probenpräparation und STEM-Abbildung in einem Instrument kombiniert werden, was die mikrostrukturelle Untersuchung beschleunigt [3]. Beispielphaft zeigt Abbildung 5d eine STEM-Aufnahme einer GdBCO-Schicht im SEM (STEM-in-SEM) in Aufsicht. So kann die Verteilung der Fremdphasen untersucht werden. Zudem sind auch Zwillingskorn- grenzen zu erkennen.

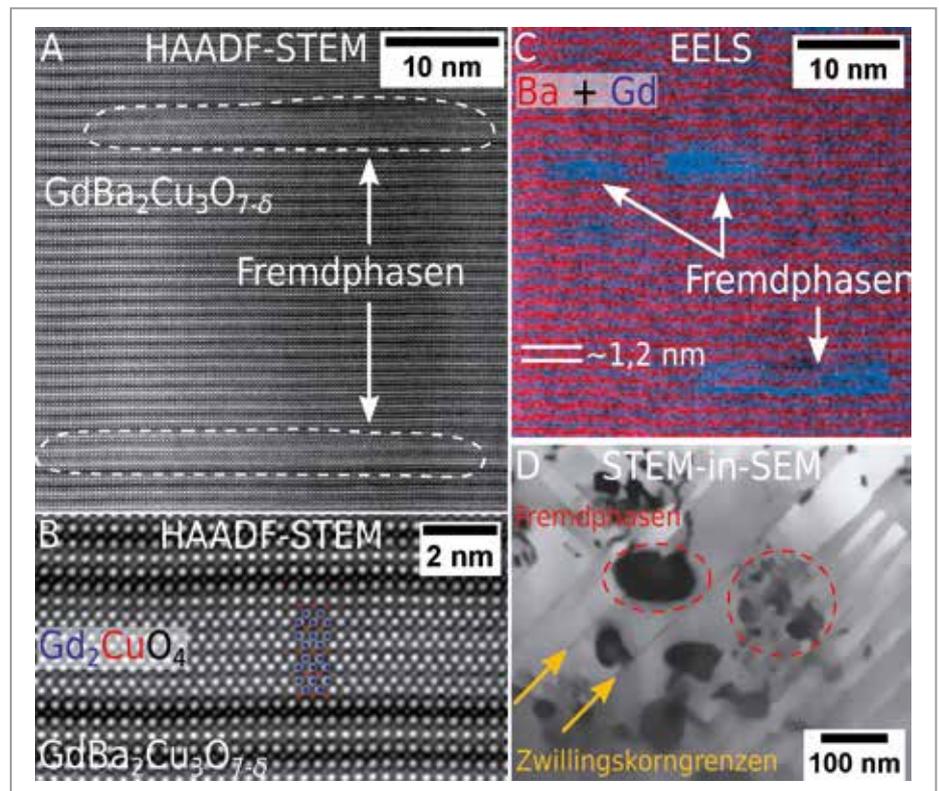


Abb. 5: (a,b) HAADF-STEM-Querschnitt von Gd₂CuO₄-Fremdphasen in GdBa₂Cu₃O₇, sowie (c) Verteilung von Ba (rot) und Gd (blau). (d) STEM-in-SEM-Aufsicht GdBCO-Dünnschicht mit Fremdphasen und Zwillingskorn-grenzen.

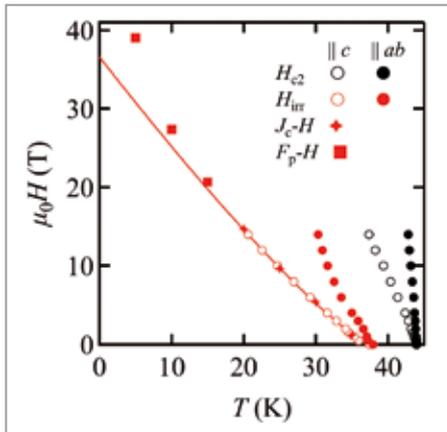


Abb. 6: B-T-Phasendiagramm einer NdFeAs(O,H)-Dünnschicht mit Irreversibilitätsfeld und oberem kritischem Feld für beide kristallographischen Hauptrichtungen [4].

Fe-BASIERTE SUPRALEITER

Auf dem Gebiet der Fe-basierten Supraleiter haben wir in einer Zusammenarbeit mit der Universität Nagoya die Pinningeigenschaften von neuartigen mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) gewachsenen NdFeAsO-Schichten zu bestimmen. Die H-Substitution von Sauerstoff in dieser Verbindung zeichnet sich durch einen weit größeren Substitutionsbereich als für die F-Substitution aus. Solche Schichten sind bisher kaum hergestellt und untersucht worden. In detaillierten Transportmessungen erstellten wir das Phasendiagramm (Abbildung 6) und bestimmten verschiedene Magnetfeld-Temperaturbereiche für unterschiedliche Pinning-Arten wie schwach – stark, intrinsisch – extrinsisch, 2D – 3D etc. [4]

F-dotierte NdFeAsO-Schichten auf technischem Substrat, ebenfalls mit MBE in Nagoya gewachsen, dienen als Evaluierungstests für eine mögliche Anwendung dieser Materialien in Bandleitern. An einer dieser Proben wurde durch die Kombination von Transportmessungen und detaillierten mikrostrukturellen Untersuchungen in Transmissionselektronenmikroskopie, vorgenommen an der Universität Kyushu, besonders die Bedeutung der Korngrenzen-Tripelpunkte im Zusammenspiel mit anderen Defektarten für die Flussverankerung ermittelt [5].

BANDSTAPEL

In den vergangenen Jahren sind Bandstapel, das heißt Stapel aus kurzen Stücken

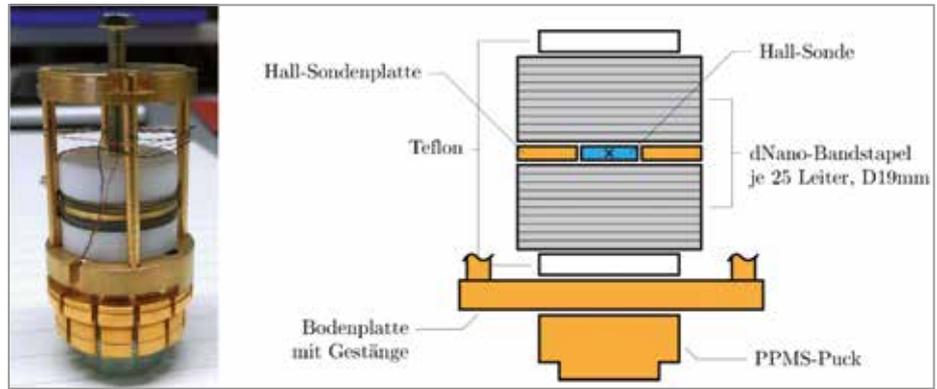


Abb. 7: Foto und Schema der Anordnung zur Messung von Magnetisierungs- und Kriechverhalten von Bandleiterstapeln.

von supraleitenden Bandleitern, als Alternative zu schmelztexturierten Proben, aber auch Magnetspulen, für die Erzeugung von starken Haft- oder Levitationskräften oder von starken homogenen Feldern immer interessanter geworden. Der Forschungsbereich untersuchte im Rahmen mehrerer Bachelorprojekte das Magnetisierungs- und Kriechverhalten solcher Stapel sowohl in Magnetisierungsmessungen mithilfe einer speziellen für das PPMS geeigneten Messvorrichtung (Abbildung 7) als auch mit Comsol-programmierten Finite-Elemente-Simulationen.

Referenzen

- [1] R. Hayasaka et al., Scientific Reports **10**, 19934 (2020).
- [2] K. Iida et al., Supercond. Sci. Technol. **34**, 015009 (2021).
- [3] L. Grünwald et al., Microscopy and Microanalysis **27**, 1056 (2021).
- [4] K. Iida et al., Scientific Reports **11**, 5636 (2021).
- [5] Z. Guo et al., ACS Appl. Electron. Mater. **3**, 3158 (2021).

Kontakt: jens.haenisch@kit.edu

LEITER- UND KABELTECHNOLOGIEN

Dieses Forschungsthema konzentriert sich auf die Entwicklung von HTS-Leiter- und Kabelarchitekturen für spezifische Anwendungsszenarien, sowie auf deren Umsetzung in Leiter-/Kabellängen, die eine Realisierung von Demonstratoranwendungen erlauben.

R&D-PILOTLINE FÜR HTS-BANDLEITER

Eine für das Forschungsfeld Supraleiter- und Kryomaterialien strategisch längerfristige Forschungsaktivität entwickelte sich 2021 mit dem beginnenden Aufbau einer kompletten HTS-Bandleiter-Syntheselinie zur Realisierung vollständiger Leiterarchitekturen für Supraleiteranwendungen in der Energie- und Magnettechnik. Kern dieser Aktivitäten ist der Abschluss einer langfristigen Kollaborationsvereinbarung mit dem CERN über die Entwicklung hochstromtragender und anwendungsspezifischer HTS-Bandleiterarchitekturen. Die vorerst auf fünf Jahre angelegte KIT-CERN Collaboration on Coated Conductor (KC⁴) beinhaltet den Aufbau und den Betrieb einer industriellen R&D-Syntheselinie zur Herstellung ausreichend langer RE123-Bandleiterarchitekturen sowie deren konsequente Anpassung auf anwendungsspezifische Erfordernisse in magnet- und energietechnischen Anwendungen, wie HTS-basierte Beschleunigermagnete oder rotierende Maschinen. KC⁴ baut auf den überaus erfolgreichen Bruker Arbeiten zur industriellen Synthese von Y123 Coated Conductor für Hochfeldanwendungen auf und wird entsprechenden Schichtabscheidungsanlagen nutzen. Der Aufbau dieser kompletten RE123-R&D-Syntheselinie erforderte 2021 die Umwidmung und den Umbau von ca. 500 m² Laborfläche am ITEP, was zumal unter Corona-Bedingungen eine große Herausforderung war. 2022 werden diese Arbeiten vollständig abgeschlossen werden. Ein besonderes Highlight der eingesetzten Bruker Technologie ist die aktuell international unikale Möglichkeit, breite IBAD-basierte RE123-Bandleiter bis zu 40 mm Bandbreite und RE123-Folien bis zu Dimensionen von 30 cm x 100 cm herzustellen und damit neue

Forschungsansätze für supraleitende Magnet- und Energieanwendungen zu ermöglichen.

ESA HTS HARNESS – STROMZUFÜHRUNGEN FÜR SUB-KELVIN-KÜHLER AUF SATELLITEN

Verschiedene im Rahmen des ESA-Programms „Cosmic Vision and Voyage 2050“ geplante Satellitenmissionen werden Instrumente mit extrem empfindlichen Detektoren verwenden, die auf Temperaturen unter 1 K gekühlt werden müssen. Komplexe kryogene Ketten mit verschiedenen Arten von Kühlern werden eingesetzt, um eine ausreichende Kühlleistung bei verschiedenen Temperaturniveaus zu gewährleisten. Die niedrigsten Temperaturen im Bereich von 50-100 mK können mit adiabatischen Entmagnetisierungskühlern (ADRs) erreicht werden, die starke Magneten für die Magnetisierungs- und Entmagnetisierungszyklen benötigen. Aufgrund der begrenzten elektrischen Leistung, die auf Satelliten zur Verfügung steht, werden ADR-Magnete in der Regel mit Strömen von nur wenigen Ampere betrieben. Die Stromzuführungen, welche die Stromversorgung auf einem höheren Temperaturniveau mit dem Magneten bei niedriger Temperatur verbinden, sind eine Hauptquelle für die Wärmebelastung bei tiefen Temperaturen. Durch den Einsatz von Supraleitern kann diese Wärmebelastung minimiert werden.

Im Rahmen eines ESA-Auftrags wird seit Februar 2021 ein Stromzuführungssystem auf der Basis von Hochtemperatursupraleitern der zweiten Generation (REBCO-Bandleiter) entwickelt, das bis zu einer Temperatur von 85 K mit einem Nennstrom von 2 A und einem Maximalstrom von 5 A arbeiten kann. Die Entwicklungsarbeiten werden im Rahmen des ESA-Programms „Technology Development Element“ (TDE) finanziert, wobei Neutron Star Systems als Hauptauftragnehmer fungiert. Das KIT leitet die technische Entwicklung als Unterauftrag-

nehmer, CEA Grenoble ist für die Testkampagne zuständig, Madrid Space ist für die Simulation verantwortlich.

Die Anforderungen der ESA an das 1 m lange Kabel umfassen ein flexibles Design, das minimale Biegeradien von 50 mm in allen Raumrichtungen erlaubt, einen Kabelmantel zur elektrischen Isolation und zum Schutz vor Feuchtigkeit, elektrische Anschlüsse an PhBr-Drähte bei 85 K und an NbTi-Drähte bei 4 K, mechanische Halterungen bei Temperaturen von 80 K und 30 K und eine maximale Wärmebelastung von 1 mW am kalten Ende für den Nennstrom von 2 A. Im Rahmen des ESA-Auftrags wurden zunächst Messungen der Eigenschaften von Strukturmaterialien und von REBCO-Bändern verschiedener Anbieter durchgeführt. Durch Laserschneiden konnte die Breite der REBCO-Bänder entsprechend der Wärmeleitfähigkeit und der Strombelastbarkeit bei der Maximaltemperatur von 85 K eingestellt werden. Zum Schutz vor Feuchtigkeit und als elektrische Isolation werden die REBCO-Bänder mit Parylene C beschichtet und anschließend mit Kapton laminiert. Zur elektrischen Isolation und thermischen Ankopplung der Stecker an die 85 K- und 4 K-Niveaus im Kryostaten wurde ein Design vorgeschlagen, bei dem elektrisch isolierendes aber thermisch gut leitfähiges Aluminiumnitrid (AlN) eingesetzt wird. Die mechanischen Halterungen bei einer Temperatur



Abb. 8. Design der ESA HTS-Stromzuführung für Sub-Kelvin-Kühler auf Satelliten.

von 80 K werden aus thermisch schlecht leitfähigem PEEK hergestellt, während die Halterung bei 30 K zur thermischen Ankopplung aus Aluminium gefertigt wird. Modellrechnungen von Madrid Space zeigen, dass das vom ITEP vorgeschlagene Design (Abbildung 8) die thermischen und mechanischen Anforderungen erfüllen kann. Die Fertigung der Stromzuführungen sowie verschiedene Tests am ITEP und bei CEA Grenoble sind für das erste Halbjahr 2022 geplant.

Kontakt: bernhard.holzapfel@kit.edu

STRUKTUR- UND FUNKTIONSMATERIALIEN FÜR KRYOANWENDUNGEN

UMBAU DER FBI-ANLAGE ABGESCHLOSSEN

Die Entwicklung supraleitender Kabel für Fusionsmagnete reicht mehrere Jahrzehnte zurück. Sie begann mit Niedrigtemperatur-Supraleitern (low-temperature superconductors – LTS). Heute werden innovative Lösungen mit Hochtemperatur-Supraleitern (high-temperature superconductors – HTS) vorangetrieben. Ein wesentlicher Schlüssel zur Untersuchung und Qualifizierung für die Anwendung und Validierung der Modellierung solcher Kabelkonzepte ist das aussagekräftige Experiment. Es wird durch eine FBI-Einrichtung (F – Kraft, B – Magnetfeld, I – Strom) ermöglicht. Diese Einrichtung bildete bereits vor mehr als 20 Jahren die Grundlage für die Charakterisierung von LTS-Kabeln bei 4,2 K. Angesichts der neuen Anforderungen an HTS-Kabel hinsichtlich der Testtemperatur (variabel 4,2 K bis 77 K) und dauerhaft hoher Betriebsströme bis 10 kA war es unumgänglich, wesentliche Komponenten der Einrichtung zu ersetzen und die Charakterisierungsmöglichkeiten zu erweitern. Nach einer zweijährigen Modernisierungsphase, bei der auch die vollständige Verdrahtung ersetzt wurde, kann nun bei-



Abb. 9: Neu aufgebaute Messtechnik der FBI-Anlage.

spielsweise anhand einer Mehrkanalmessung der dynamische Quenchvorgang eines Kabels beobachtet werden und mit Modellen verglichen werden (Abbildung 9). Experimente an verschiedenen Kabelarchitekturen basierend auf einem CroCo-Triplett wurden zur Prüfung der MSR-Technik genutzt [1]. Die Anlage ist nun Teil der EUROfusion-Testanlagen im Arbeitspaket Magnete (WPMAG).

BESTIMMUNG VON THERMISCHEN KONTAKTWIDERSTÄNDEN

Quenchexperimente in der FBI-Anlage und in der Schweizer Supraleiter-Testanlage SULTAN zeigen die Grenzen der sicheren Betriebsparameter supraleitender Kabel für Magnete. Um das Verhalten verschiedener Kabelarchitekturen modellhaft abzubilden, sind neben den supraleitenden Eigenschaften der HTS-Bänder auch die Materialeigenschaften der verwendeten normalleitenden Komponenten entscheidend. Bereits 2020 wurde daher ein Experiment zur Bestimmung der Wärmeübertragung zwischen Kupfer bzw. Stahl konzipiert; erste Ergebnisse wurden bereits erzielt [2]. Allerdings zeigte sich bereits damals die Beein-

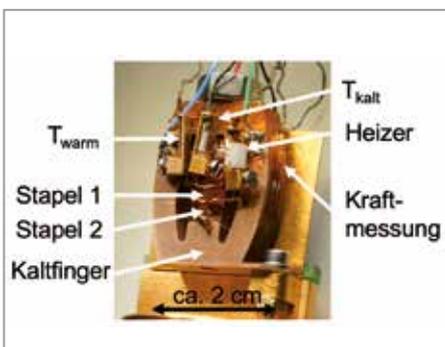


Abb. 10: Instrumentierter Kupferrahmen mit zwei eingesetzten Stapeln (Cu-Cu), um gleichzeitig den Anpressdruck zu messen.

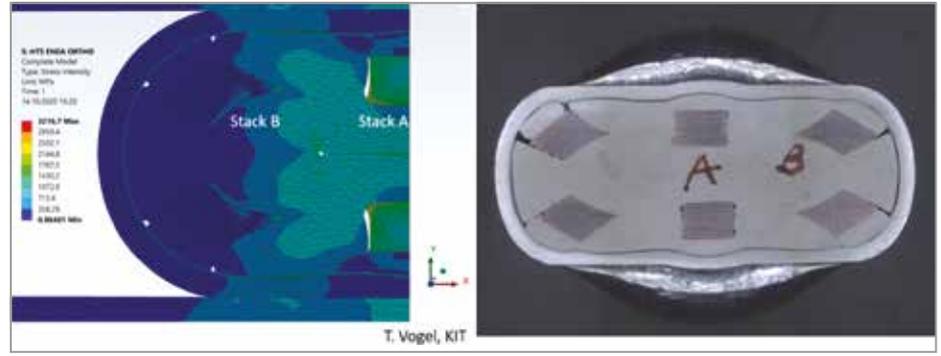


Abb. 11: Vergleich der FEM-Modellierung der Verformung unter Querkräften mit dem Ergebnis des Experiments (ursprünglicher runder Kabeldurchmesser ca. 2,6 cm).

flussung des Wärmeübergangs durch den Anpressdruck. Wegen der auf das Kabel wirkenden Lorentzkräfte in einem Magneten ist dies ein wesentlicher Parameter bei der Beschreibung der elektrischen und thermischen Kontaktwiderstände der Kabelkomponenten. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein spezieller Messrahmen zur Bestimmung der thermischen Übergangswiderstände unter variablem Anpressdruck realisiert (Abbildung 10). Dabei wurden systematische Experimente zwischen 2 K und 300 K bei variablem Anpressdruck an Kupfer-Kupfer-, Stahl-Stahl- und Kupfer-Stahl-Kombinationen durchgeführt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Oberflächenrauheit und der Skalierung mit verschiedenen Probenabmaßen analysiert. Die Masterarbeit wird 2022 mit einer umfassenden Analyse der Ergebnisse abgeschlossen werden.

ELEKTROMECHANISCHE MODELLIERUNG SUPRALEITENDER KABEL

Das Zusammenspiel der experimentellen Ergebnisse auf Kabelebene und der Materialeigenschaften der Komponenten, wie Stahlhülle, Kupfer oder Aluminium zur Stabilisierung, wird durch eine Modellierung nachgebildet. Mithilfe der Finite-Elemente-Methode (COMSOL) gelang nun eine umfassende Beschreibung eines von ENEA (Italien) bereitgestellten HTS-Kabels (6-Slotted Cable in Conduit). Mechanisch wird die Verformung des Kabels durch transversale Kräfte im durchgeführten Experiment [3] korrekt nachgebildet (Abbildung 11). Weiterhin werden das elektrische sowie das thermische Verhalten analysiert, um Aussagen zum Verhalten, beispielsweise bei einem Quench, treffen zu können. Die Methode soll auf verschiede-

dene HTS-Kabel-Layouts angewandt werden.

PROJEKT ADHYBAU

Die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland beinhaltet die Förderung verschiedener strategisch relevanter Forschungsvorhaben. In dem vom BMWi geförderten Projekt Additive-Hybrid-Bauweisen (AdHyBau) entwickeln Siemens, MT Aerospace, Fraunhofer IWM und TU Dresden zusammen mit dem ITEP den Prototyp eines wasserstoffbetriebenen elektrischen Flugzeugmotors. Das ITEP führt dabei grundlegende kryogene Materialcharakterisierungen an Leichtbaulegierungen und kombinierten Kohlefaserkunststoffen durch. Die Resultate der kryogenen Materialeigenschaften sind wesentlich für die Entwicklung der innovativen Designansätze. Erste Veröffentlichungen dazu werden 2022 erfolgen.

Referenzen

- [1] Nickel et al, "Subscale HTS fusion conductor fabrication and testing in high magnetic background field", EUCAS 2021 to be published in IEEE Trans.Appl. Supercond.
- [2] Bagrets et al. "Thermal Resistance Between Metallic Surfaces of Copper and Stainless Steel at Different Temperatures and Contact Loads for High Current HTS Cable-in-Conduit Conductors", MT27 2021 to be published in IEEE Trans.Appl.Supercond.
- [3] Zappatore et al. "Development of the H4C Model of Quench Propagation in the ENEA HTS Cable-In-Conduit Conductor", IEEE Trans.Appl.Supercond., DOI 10.1109/TASC.2021.3059608

Kontakt: klaus.weiss@kit.edu

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen



Testaufbau von zwei 20 kA-Teilleitern für eine
200 kA-Industriestromschiene.

Energetechnische Anwendungen der Supraleitung

Koordination: Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe

Im Forschungsfeld Supraleitende Energetechnische Anwendungen bearbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des ITEP die folgenden Themen:

- Supraleitende Netz- und Energiekomponenten
- Modellierung von Supraleitern und Komponenten
- Echtzeit-Systemintegration

SUPRALEITENDE NETZ- UND ENERGIEKOMPONENTEN

Schwerpunkte des Themas Supraleitende Netz- und Energiekomponenten liegen auf der Entwicklung neuartiger Betriebsmittel für Elektroenergiesysteme sowie auf der Entwicklung von ressourcen- und energieeffizienten Anwendungen für die Energietechnik. Dazu erzielten die Forschenden 2021 folgende Ergebnisse.

Im Jahr 2019 begonnenen und vom BMWi geförderten Verbundprojekt DEMO200 (Neuartiges Supraleitendes Hochstromsystem für 200 kA Gleichstrom) verfolgt das ITEP gemeinsam mit den Partnern Vision Electric Superconductors, Messer, Trimet und THEVA das Ziel, die Technologie für eine kompakte und effiziente Industrie-

stromschiene mit einer Stromstärke von 200.000 A zu entwickeln und ihre Funktionsfähigkeit in einem Test zu demonstrieren. Dies würde gegenüber dem Stand der Technik von 20 kA eine Verzehnfachung des Stroms bedeuten und ein breites Anwendungsspektrum in der Industrie ermöglichen. Das ITEP hat innerhalb des Projekts die Aufgabe übernommen, die supraleitenden Bandleiter zu charakterisieren, die grundlegende Geometrie und die Kontakte mit zu entwickeln und einen Test an einem skalierten Stromschienelement durchzuführen. 2021 wurde ein wichtiger Projektmeilenstein erreicht, in dem zwei 20 kA-Teilleiter bei 77 K mit dem dafür vorgesehenen Nennstrom erfolgreich getestet wurden. Dem Test gingen zahlreiche Untersuchungen zur Auswahl und Kontaktierung der Supraleiter voraus. Für 2022 ist der Aufbau des 200 kA-Technologie-demonstrators in einer Industrieumgebung anvisiert.

Im Rahmen des BMWi-Verbundprojekts SuperLink zur Entwicklung eines 110 kV-

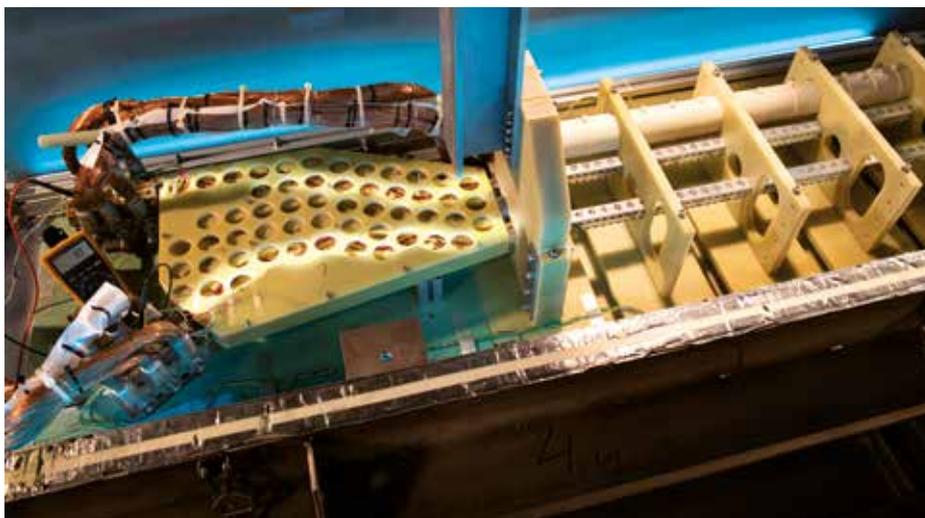


Abb. 1: Anschluss und Aufbau des modularen Subscale -Tests mit zwei supraleitenden 20 kA-Teilleitern.

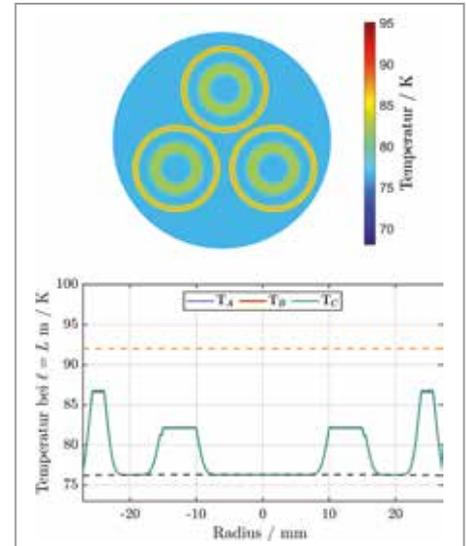


Abb. 2: Temperaturverlauf im Kabelquerschnitt nach Auftreten eines Überstroms.

500 MVA-Supraleiterkabels für die Innenstadt von München wurde ein Simulationsmodell zur Berechnung der Temperatur bei Überströmen und der daran anschließenden Rückkühlung aufgestellt. [Abbildung 2](#) zeigt beispielhaft die Temperaturentwicklung im Kabelquerschnitt. Das Modell wurde mit Rechnungen des Industriepartners überprüft; dabei ergaben sich sehr gute Übereinstimmungen. Somit können nun auch dreiphasige, nebeneinanderliegende supraleitende Kabel sehr genau bezüglich des elektrischen und thermischen Verhaltens modelliert werden.

Innerhalb einer Kooperation mit Rolls-Royce Electric wurde ein noch unfertiger Teststand zum Test schnell rotierender kryogener supraleitender Spulen an unser Institut geliefert. Dieser Teststand wird innerhalb einer neu begonnenen Doktorarbeit zur Entwicklung von supraleitenden 3D-Spulen für rotierende Maschinen in den nächsten Jahren komplettiert und in Betrieb genommen.

2021 wurden mehrere Studien für die Anwendungen supraleitender Leitungen und Strombegrenzer für verschiedene Energieversorgungsunternehmen bearbeitet. Vor allem der Anstieg der Kurzschlussleistung als Folge des Netzausbaus, bedingt durch die Energiewende, lässt die Nachfrage nach supraleitenden Strombegrenzern deutlich ansteigen. Weiterhin wurde die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer GW-Gleichstrom-Übertragungsleitung bei einer Spannung von nur 50 bis 100 kV untersucht und mit konventionellen Lösungen verglichen.

Supraleitende Magnetheizer ermöglichen bei der Erwärmung von Metallen für die Industrie eine Energieeinsparung gegenüber bisherigen Methoden um mehr als 30 Prozentpunkte und wurden bereits in Einzelstücken gebaut und betrieben. Bisher sind jedoch noch nicht alle betrieblichen Anforderungen erfüllt. Das wesentliche Ziel des ITEP im BMWi-Verbundprojekt ROWAMAG (Robuster und wartungsarmer Magnetheizer mit HTS-Spulen für Warmumformprozesse) zum Aufbau und Test eines robusten und wartungsarmen Magnetheizers mit Supraleitern ist deshalb, ein langlebiges Kryosystem inklusive des Kryostaten und der Kälteanlagen zu entwickeln. Gemeinsam mit den Partnern THEVA, Bültmann und Beck Maschinenfabrik integrierte das ITEP 2021 die supraleitende Spule in das Gehäuse (Abbildung 3). Alle Komponenten sind gefertigt, und der Zusammenbau des



Abb. 3: Die Spulenhalterung bei der Fertigung.



Abb. 4: RIS-Durchführung außerhalb des Kryostaten (links) und in eingebautem Zustand (rechts) mit Aufbau zur Schering-Brücken-Messung.

supraleitenden Magneten hat am ITEP begonnen. Weiterhin wurden 2021 die zur Anwendung kommenden Kryokühler ausführlich vorgetestet.

Hochspannungsdurchführungen für kryogene Anwendungen sind vorzugsweise feststoffisoliert, um Probleme durch Kondensation oder Sublimieren von gasförmigen Isolierstoffen zu vermeiden. Im Mittelspannungsbereich wurden für Kleinserien am ITEP unter anderem glasfaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt. Für den Mittel- und Hochspannungsbereich wurden bisher kommerziell angefertigte Isolatoren auf Basis von epoxidharzgetränkten Papierwickeln (RIP) verwendet. Bei konventionellen Hochspannungsdurchführungen werden unter sehr feuchten Bedingungen seit wenigen Jahren andere Werkstoffe verwendet, weil bei der RIP-Technologie Degradierungen der Isolierung im Zusammenhang mit Feuchtig-

keit auftraten. Im kryogenen Hochspannungslabor wurde deshalb ein neuartiger RIS-Isolierwickel (Abbildung 4) (resin impregnated synthetic) untersucht. Aus Kostengründen wurde eine AC-Durchführung mit einer Nennspannung von 25 kV gewählt. Beim beschafften Typ befindet sich die Isolierung direkt auf einem zentralen Kupferstab. Der Nennstrom der Durchführung beträgt 2 kA. Aufgrund des massiven Kupferinnenleiters mit fehlender Gasbarriere zur umgebenden Isolierung war mit Vereisungen an der raumtemperaturseitigen Oberfläche zu rechnen. Es wurde deshalb eine Freiluftdurchführung beschafft.

Nach fünf thermischen Zyklen mit Abkühl-dauern von Raumtemperatur auf 77 K von circa zwei Stunden wurde keine Schädigung festgestellt. Neben der Überprüfung der Eignung als AC-Durchführung wurden Hochspannungstests für DC-Durchführun-



Abb. 5: RIS-Durchführung in optischer (links) und thermografischer Darstellung (rechts). Die tiefste Temperatur beträgt $-7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

gen erfolgreich abgeschlossen. Sämtliche Hochspannungstests wurden somit bestanden. Bei der Dichtheitsprüfung wurden zwei Mängel festgestellt. Eine Fehlstelle an der Druckentlastungsschraube am Halteflansch bedarf keiner eingehenderen Untersuchung, weil diese Vorrichtung in zukünftigen Durchführungen nicht mehr gebraucht wird. Die axiale Undichtigkeit vom Behälterraum zum raumtemperaturseitigen Kopfende muss zukünftig durch bessere Abdichtungen verhindert werden.

Die thermische Isolierung erfolgte lediglich mit Dämmstoff für die Innenraumanwendung. Diese Maßnahme erwies sich als ausreichend, um Eisbildung im Bereich des Spannungsanschlusses am raumtemperaturseitigen Ende zu verhindern. Die Temperaturmessung am abgekühlten Prüfling (Abbildung 5) zeigt die ausreichende Wirkung der thermischen Isolierung am oberen Ende für den durchgeführten Betrieb im Innenraum. Erkennbar ist ebenso, dass sich auf den Rippen kein Eis bildete. Für einen Dauerbetrieb wären Verbesserungen der thermischen Isolierung im Bereich der unteren Flanschbefestigung sinnvoll, um die Verluste zu reduzieren.

Kontakt: mathias.noe@kit.edu

MODELLIERUNG VON SUPRALEITERN UND KOMPONENTEN

Um das Potenzial eines vollsupraleitenden Generators zu untersuchen, wurde ein internes Modell für einen vollsupraleitenden Windgenerator entwickelt, der weder Stator-Eisenzähne noch Rotor-Eisenpole hat. Bei der Konstruktion dieser Art von Generatoren gibt es zwei Herausforderungen: erstens die Bestimmung der Betriebsströme in den Stator- und Rotorspulen, wobei die relative Permeabilität der Stator- und Rotorkerne aufgrund der nichtlinearen Beziehung zum Magnetfeld voneinander ab-

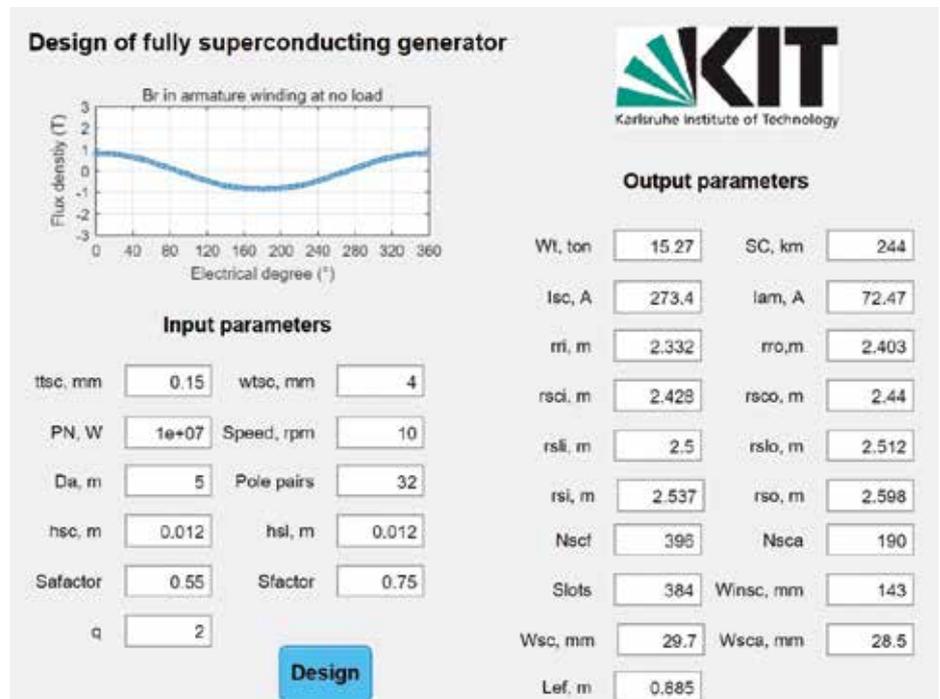


Abb. 6. Grafisches User-Interface des Simulationsmodells zur Auslegung vollsupraleitender Windkraftgeneratoren.

hängt, zweitens die Komplexität der Abschätzung der Wechselstromverluste der Statorspulen aufgrund der kombinierten Auswirkungen des magnetischen Wechselstroms und des zugeführten Wechselstroms. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurde ein auf analytischen Gleichungen basierendes Iterationsverfahren für die Bestimmung des Betriebsstroms und der relativen Permeabilität sowie für die Aktualisierung der Geometrieparameter entwickelt. Abbildung 6 zeigt die grafische Benutzeroberfläche des entwickelten Algorithmus. Der ermittelte Betriebsstrom und die relative Permeabilität können dann als Eingangsparameter für die Abschätzung der Wechselstromverluste im Stator mithilfe einer Finite-Elemente-Software verwendet werden.

Im Rahmen des BMWi-Projekts SupraGenSys wurden mithilfe von Finite-Elemente-Simulationen auf der Grundlage der T-A-Formulierung verschiedene Konfigurationen

der Statorspulen untersucht, um die Verluste eines supraleitenden 10-MW-Generators für Windkraftanlagen zu minimieren. Die beste Anordnung basiert auf nichtplanaren Spulen und erreicht eine 85-prozentige Reduzierung der AC-Verluste im Vergleich zu den klassischen Racetrack-Spulen. Diese neue Konfiguration ermöglicht eine bessere Ausnutzung der Kapazität des supraleitenden Bands, indem eine gleichmäßigere Stromdurchdringung in den Bändern erreicht und die Sättigung einzelner Spulen vermieden wird. Die Ergebnisse regen die Entwicklung geeigneter Spulen und komplexerer Konfigurationen an, um die technischen Herausforderungen supraleitender Generatoren für Windkraftanlagen zu bewältigen.

Die T-A-Formulierung wurde auf drei Dimensionen erweitert, um die Berechnung der Wechselstromverluste in supraleitenden Spulen mit komplexen Formen zu ermöglichen. Für diese Art von Berechnungen

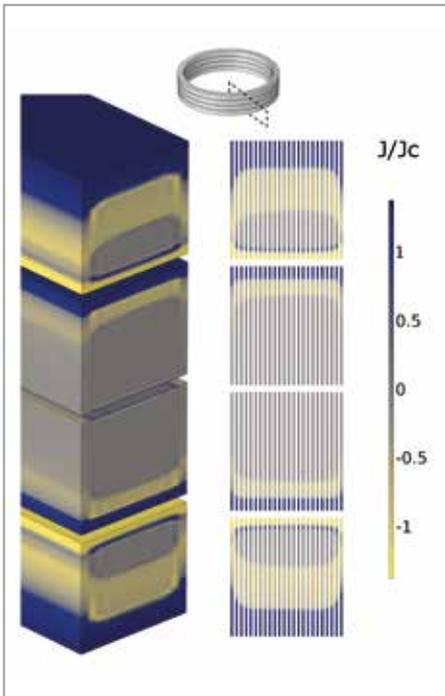


Abb. 7: Vergleich der Stromdichteverteilung in vier HTS-Pancakespulen, berechnet mit den homogenisierten und nicht-homogenisierten Modellen.

werden die supraleitenden Windungen nicht einzeln simuliert, da dies eine zu große Zahl von Freiheitsgraden erzeugen und damit zu unpraktischen Berechnungszeiten führen würde. Stattdessen werden die supraleitenden Windungen zu einem einzigen Leiter homogenisiert, was die Verwendung eines viel weniger detaillierten Netzes ermöglicht. Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Stromdichteverteilungen, die durch die Simulation aller einzelnen Windungen und mit der homogenisierten Technik erzielt wurden. Die Ergebnisse sind praktisch nicht zu unterscheiden, aber das homogenisierte Problem kann sehr viel schneller gelöst werden. Das Modell wurde auch anhand von Experimenten aus der Literatur validiert und daraufhin verwendet, um das elektromagnetische Verhalten von Spulen mit komplexeren Formen zu untersuchen, beispielsweise von Rennbahnschleifen einschließlich der Endeffekte, von D-förmigen Spulen und von verdrehten Stapeln von HTS-Bändern für Fusionsanwendungen.

Um Studierende in einige wichtige Themen einzuführen, die für supraleitende Anwendungen relevant sind, richtete das ITEP in Zusammenarbeit mit der École polytechnique fédérale de Lausanne einen Webserver mit Anwendungen auf der Grundlage von

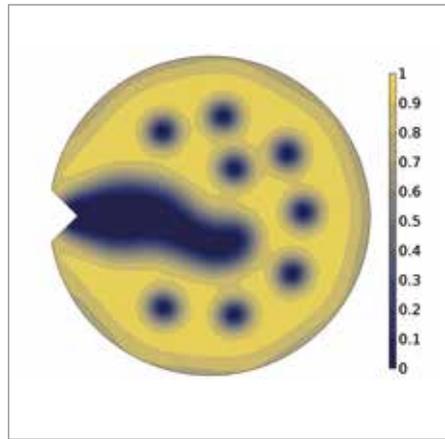


Abb. 8: Beispiel für das Eindringen des magnetischen Flusses in einen Typ-II-Supraleiter, berechnet mit den auf dem Anwendungs-Webserver AURORA (<https://aurora.epfl.ch>) verfügbaren numerischen Modellen.

COMSOL Multiphysics ein. Mit diesen Online-Anwendungen können sich die Studierenden auf den relevanten Aspekt der Physik konzentrieren und die Simulationen von überall aus durchführen; sie benötigen dazu lediglich eine Internetverbindung. Zurzeit gibt es sieben Anwendungen, die von der Physik der Supraleiter (Abbildung 8) bis hin zu groß angelegten Anwendungen reichen.

Kontakt: francesco.grilli@kit.edu

ECHTZEIT-SYSTEMINTEGRATION

Die Gruppe Echtzeit-Systemintegration befasst sich mit der Modellierung, Steuerung und experimentellen Validierung von Hochleistungs-Energetechnologien. Der Fokus liegt vor allem auf der Entwicklung neuer effizienter Echtzeitmodelle dieser Energietechnologien, die experimentell validiert sind und das Hardwareverhalten mit höchster Detailgenauigkeit reproduzieren können.

Im Juli 2021 startete die Helmholtz-Nachwuchsgruppe „Hybride Netze: Ein multimodales Design für das zukünftige Energiesystem“. Der Fokus dieser Nachwuchsgruppe liegt auf dem Design von multimodalen und leistungselektronischen Energiesystemen (Abbildung 9). Zu den Forschungsthemen gehören die Entwicklung von Methoden zur effizienten Verringerung der Rechenzeit für die Modellie-

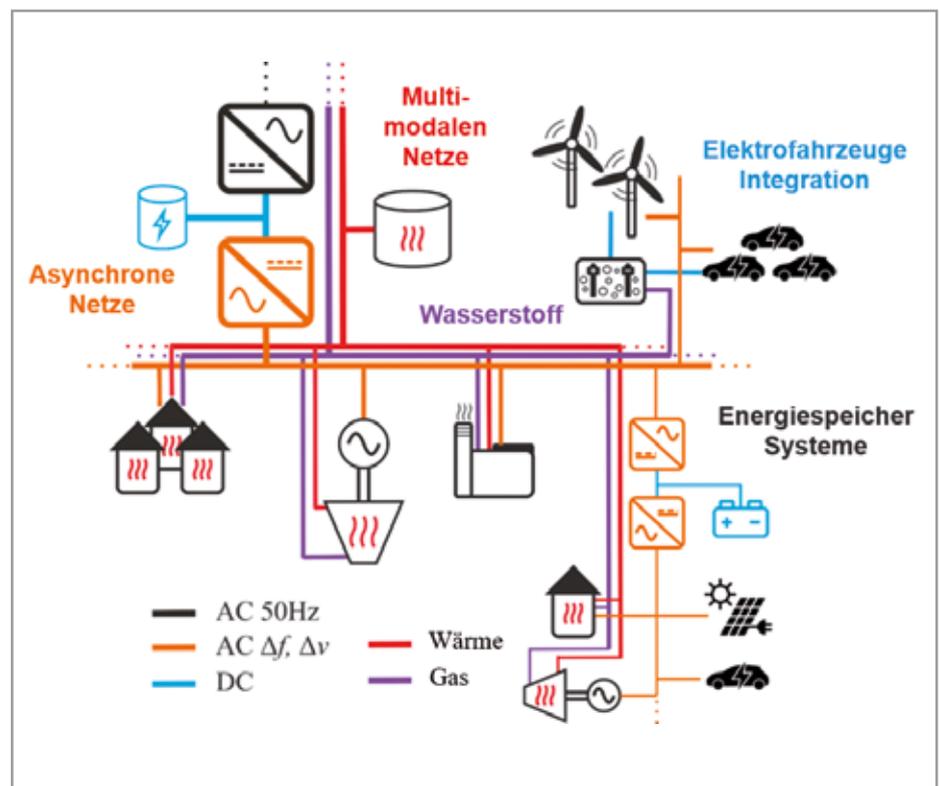


Abb. 9: Hybride-Netze-Konzept.

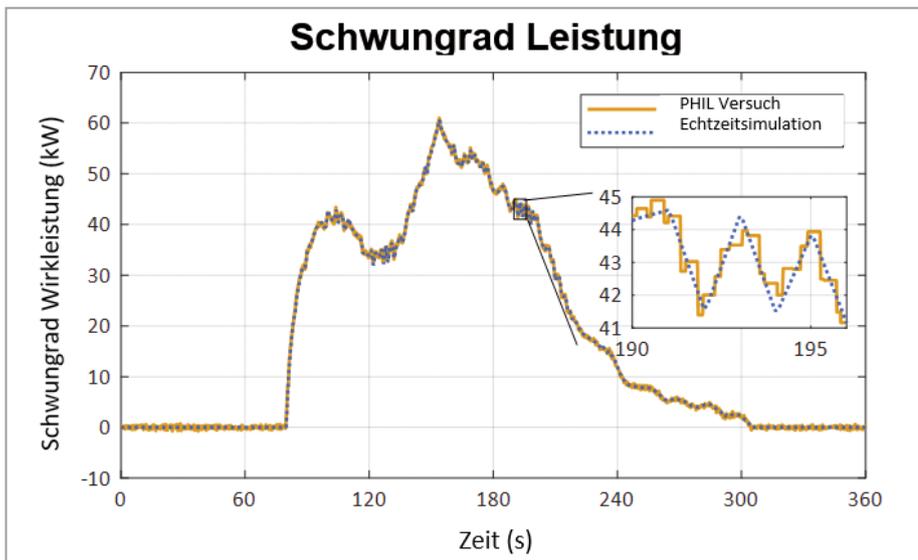


Abb. 10: Leistungsprofil des Schwungrads der realen Hardware (gelbe Linie) und des simulierten Modells (blaue Linie).

zung von Energieressourcen in digitalen Echtzeitsimulatoren ohne Beeinträchtigung der Modellgenauigkeit, die Entwicklung neuer Steuerungslösungen für asynchrone Netze, die dazu beitragen, die Steuerbarkeit des gesamten Energiesystems zu verbessern, der Vorschlag neuer Ansätze zur Bewältigung des Kurzschlussproblems in leistungselektronischen Netzen sowie die Entwicklung eines neuen experimentellen Prüfstands, der multimodale Hardware-in-the-Loop, der die multimodale Validierung von Energietechnologien unter realistischen Bedingungen ermöglicht.

Anfang 2021 wurde das 60 kW-3,6 kWh-Hochgeschwindigkeitsschwungrad der Firma STORNETIC umfassend mit dem Power-Hardware-in-the-Loop-Ansatz validiert. Das Schwungrad wurde in einem digitalen Echtzeitsimulator modelliert, und die Modellgenauigkeit wurde anhand von Versuchsergebnissen validiert. Dabei wurden realistische Testfälle berücksichtigt, wie die große Frequenzabweichung in Großbritannien im Jahr 2019. Wie in Abbildung 10 beim Vergleich des simulierten Modells mit der Hardwareleistung bei gleichem Frequenzeingang zu sehen ist, gibt es nur eine minimale Abweichung zwischen ihnen. Dies beweist die Genauigkeit des Modells für die Frequenzregelung unter realistischen Netzbedingungen. Die Ergebnisse wurden in der internationalen Fachzeitschrift „Journal of Energy Storage“ veröffentlicht.

Weitere Fortschritte wurden auch bei der Modellierung multimodaler Ressourcen erzielt, wie bei der 3,5 kW elektrischen und 15 kW thermischen Mikrogasturbine im Energy Lab 2.0. In einem ersten Schritt wurde im BMBF-Verbundprojekt Sektor-

kopplung (SEKO) die Mikrogasturbine (Abbildung 11 oben) sowohl in Simulink als auch in einem eigenen Skriptcode modelliert, wobei die Leistung des Skriptcodes in Bezug auf Genauigkeit (<1 % Fehler) und Rechenzeitgewinn (29-fache Reduzierung der Simulationszeit) validiert wurde. Darüber hinaus wurden die Modelle mit den Hardwareergebnissen unter verschiedenen Modellierungsannahmen verglichen (in Abbildung 11 unten wurde die elektrische Ausgangsleistung aufgetragen), was eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den experimentellen Ergebnissen zeigt. Weitere Untersuchungen sind für das Jahr 2022 geplant, wobei auch thermische und gasförmige Variablen in die Modellierung einbezogen werden sollen.

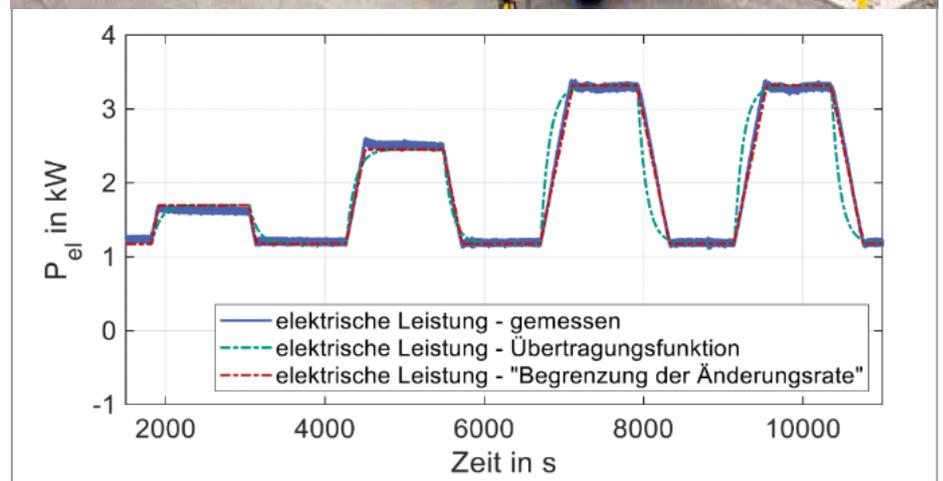


Abb. 11: Mikrogasturbine im Aufbau (links) sowie experimentelle Validierung der entwickelten Modelle – elektrische Leistung in kW (rechts).

Das Jahr 2021 war auch durch die Stärkung der Zusammenarbeit zwischen der Real Time System Integration Gruppe und dem Teilchenbeschleuniger KARA auf dem KIT Campus Nord gekennzeichnet. Das Future Fields Stage 2 Projekt „Energiesparpotentiale in Teilchenbeschleunigern zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Kommunikationsinfrastruktur zwischen KARA und Energy Lab 2.0 entworfen, die es ermöglicht, die Daten der elektrischen Variablen, wie Spannung und Strom, in Echtzeit, beispielsweise mit einer Rate von 10 kHz, in den digitalen Echtzeitsimulator des Energy Lab 2.0 zu übertragen. Diese Kommunikationsinfrastruktur wird derzeit aufgebaut und ermöglicht die Entwicklung datengesteuerter Modelle des Beschleunigers KARA in Echtzeit und somit die Validierung der Leistung von Energietechnologien, wie des 60 kW-Schwungrads, mithilfe der Power-Hardware-in-the-Loop-Technik. Das Projekt läuft derzeit noch und wird 2022 abgeschlossen werden.

Im Bereich der Supraleitung wurden Fortschritte bei der Modellierung von supraleitenden Kabeln erzielt. Das 2D-Finite-Elemente-Modell eines HTS-Kabels wurde im Rahmen des SuperLink-Projekts für Transienten erstellt (Abbildung 12) und dann als Grundlage für die Entwicklung eines Modells zur digitalen Echtzeitsimulation verwendet, das genaue Leistungen für die angestrebten Anwendungen zeigt.

Das Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Labor verbesserte sich gegenüber dem vorangegangenen Jahr deutlich und nahm 2021 offiziell den Betrieb auf. Die PHIL-Halle wurde in fünf Funktionsbereiche unterteilt, die eingezäunt sind und unabhängig voneinander betrieben werden können. Dies erhöht die Testmöglichkeiten in der

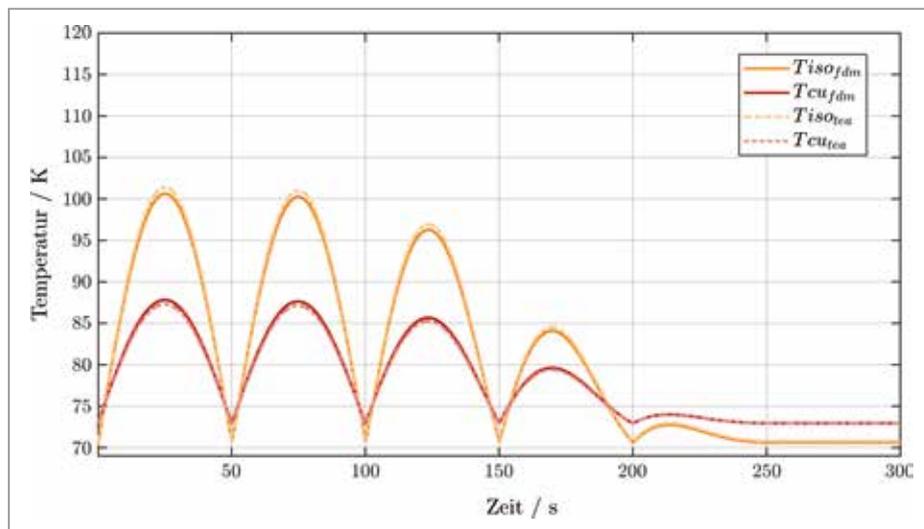


Abb. 12: Finite-Elemente-Modellierung eines HTS-Kabels und validiertes Echtzeitmodell.

PHIL-Halle enorm, da bis zu fünf verschiedene Experimente parallel durchgeführt werden können. Umfangreiche Geräte wurden angeschafft, um die Simulations- und Versuchsmöglichkeiten des Labors zu erweitern: OPAL-RT-Lizenzen (FPGA, RT-Lab, ePhasorSim), RTDS-Lizenzen, ein 45 kW-Spitzenberger&Spies-Linear-Leistungsverstärker, ein 250 kW-DC-Emulator und Software zur Verbesserung der Steuerbarkeit der 1 MVA-Egston-Leistungsverstärkergruppe. Das Schwungradsystem wird ebenfalls auf 120 kW erweitert. Darüber hinaus werden derzeit zwei neue Anlagen konzipiert und realisiert.

Im Rahmen des BMWi-Verbundprojekts Flygrid wird ein 500 kW-1,6 kWh-Superkondensator-Energiespeicher in seinem Gehäuse installiert; er wird Anfang 2022 erstmals in Betrieb genommen werden. Dieses Speichersystem, das als schnelle Stromquelle fungiert, kann schnelle dynamische Dienste für das Netz bereitstellen. Darüber hinaus wird das Superkondensatorsystem im Energy Lab 2.0 seinen kombinierten Einsatz mit dem Schwungrad ermöglichen, um die Leistung hybrider Energiespeichersysteme bei der Bereitstellung von Dienstleistungen wie Span-

nungs- und Frequenzstützung für das Netz unter realistischen Netzbedingungen zu bewerten.

Derzeit wird im Energy Lab 2.0 ein 50 kW-Flüssigwasserstoffkraftwerk entwickelt. ITEP und IAI bauen gemeinsam einen Elektrolyseur, einen Verflüssiger, einen Tank und ein Brennstoffzellen-Wasserstoffspeichersystem auf, das in Verbindung mit der PHIL-Anlage eine realistische Bewertung des Wasserstoffpotenzials im künftigen Energiesystem ermöglichen wird. Die endgültige Planung und der Beginn der Bauarbeiten sind für das zweite Quartal 2022 geplant.

Kontakt: giovanni.carne@kit.edu

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen



Robotisches Wickeln einer einfachen Pancake-Spule: Der Wickelkörper wird von einem Zwei-Achs-Positionierroboter gehalten. Die Wickelhand befindet sich am Wechselwerkzeug eines der beiden Sechs-Achs-Roboter – auf dem Foto noch mit einem für HTS repräsentativen Stahlband zur prinzipiellen Prozessqualifizierung.

Supraleitende Magnettechnologie

Koordination: Prof. Dr. Tabea Arndt

Im Jahr 2021 setzte das ITEP die 2020 entwickelte strategische Justierung des Forschungsfelds sowohl bei der Struktur der Themen als auch bei den Inhalten um, sodass das Forschungsfeld Supraleitende Magnettechnologie sich nun in die folgenden Themen gliedert:

- Spulen- und Magnettechnologie
- Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion
- Rotierende Maschinen

Das Forschungsthema Spulen- und Magnettechnologie ist nun anwendungsoffen aufgestellt und entwickelt neuartige Techniken für Supraleiterdrähte und deren Wicklungen, die auch komplexe, nichtplanare Formen annehmen können. Dadurch können in den verschiedenen Anwendungen vor allem HTS-Drähte besonders vorteilhaft ausgenutzt und auch komplexe Geometrien realisiert werden.

Das Forschungsthema Hochstromkomponenten für Wasserstofftechnologien und Fusion führt die Entwicklung von HTS-Hochstromleitern mit den damit verbundenen Experimenten weiter. Der zweite Fokus richtet sich auf die Wasserstofftechnologien und hat erheblich an Bedeutung gewonnen. 2021 startete das vom BMBF geförderte, vom ITEP koordinierte Verbundprojekt AppLHy! als Teil der Technologieplattform TransHyDE, eines der drei Leitprojekte des BMBF für die „Wasserstoffrepublik Deutschland“ im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie (<https://www.wasserstoffleitprojekte.de>).

Das Forschungsthema Rotierende Maschinen führt die begonnenen Arbeiten zu Windkraftgeneratoren zu Ende und erfährt eine besondere Dynamik durch die Möglichkeit des Einsatzes von DUDA-Spulen auch in rotierenden Maschinen. Diese Spulen-Technologie lässt sich besonders für kompakte Maschinen oder Maschinen mit hoher Leistungsdichte wie Windkraft und Fahrzeuge vorteilhaft einsetzen.

SPULEN- UND MAGNET- TECHNOLOGIE

Die 2020 begonnene Neuausrichtung und breitere Aufstellung des Forschungsthemas Spulen- und Magnettechnologie wurde 2021 konsequent weitergeführt. Die Entwicklung innovativer Technologien für die Fertigung und den Betrieb supraleitender Spulen und Magneten für spezifische Anwendungen steht im Vordergrund der Arbeiten. Diese umfassen neben Konzeptarbeiten vor allem die robotische Wickeltechnik, die funktionale Vakuum-Druck-Imprägnierung und die Erarbeitung alternativer Kühlkonzepte mit Kryokühlern und Thermosiphons. Die Bereitstellung von Räumen und Infrastruktur für die neuen Versuchsanlagen läuft parallel zum Umbau der Labore und zum Rückbau obsoleter Altanlagen.

ROBOTISCHES WICKELN

Der zunehmende Bedarf an Spulen mit komplexen, echt dreidimensionalen Geometrien, die nicht mehr ohne Weiteres von Hand gewickelt werden können, erfordert

die Bereitstellung innovativer Wickleinrichtungen. Für diesen Zweck wurde eine Roboterzelle konzipiert, bestehend aus zwei nichtkollaborativen Industrierobotern sowie einem dreh- und schwenkbaren Werkstückpositionierer. Die beiden Roboter verwickeln den Supraleiter, während der Spulenkörper vom Werkstückpositionierer gehalten und orientiert wird. Die Führung des Supraleiters erfolgt dabei über eine sogenannte Wickelhand. Diese wird über Flansche an Drehdurchführungen, die sich an den letzten Achsen der Roboter befinden, angedockt. Um komplexe Geometrien, die ein Um- und Durchgreifen erfordern, wickeln zu können, sind zwei Roboter nötig, die einander die Wickelhand übergeben können, um diese wechselseitig zu führen.

2021 wurde der Aufbau der Anlage fertiggestellt (Abbildung 1). Im Einzelnen wurde ein Schaltschrank mit der erforderlichen Anlagenelektronik konzipiert, neben der Steuerungselektronik wurde der Roboter aufgebaut, und die Verkabelung der



Abb. 1: Zelle zum robotischen Wickeln mit Werkstückpositionierer (links) und den beiden Robotern. Der Roboter rechts trägt die Wickelhand mit der Vorratsspule.

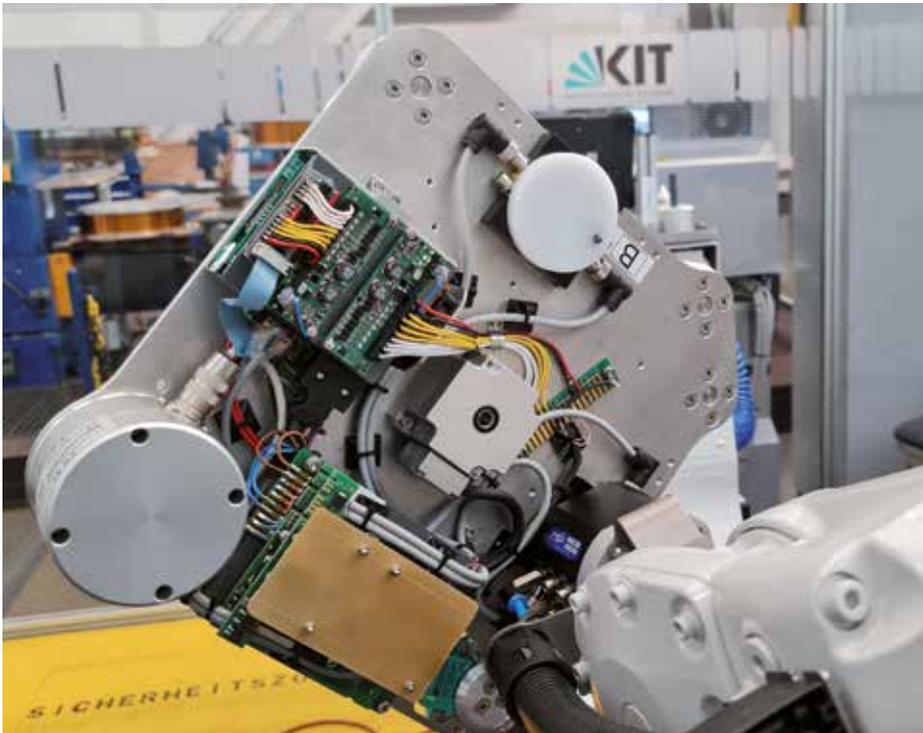


Abb. 2: Wickelhand angedockt an einen der Roboter. Zu sehen ist die Elektronikseite mit Servomotor (Mitte) und Zugkraftsensor (links).

Anlage wurde vervollständigt. Außerdem wurde die Schutzumhausung komplettiert, deren Elektronik wurde an die Robotersteuerung angeschlossen und den Sicherheitsanforderungen entsprechend programmiert und zertifiziert. Ferner wurde ein PC mit der Steuerungssoftware RobotStudio installiert, mit der Wickelvorgänge mit einem digitalen Zwilling der Roboterzelle simuliert und nach erfolgreicher Validierung programmiert werden können.

Highlights der Arbeiten waren der Aufbau und die Inbetriebnahme der selbst konzipierten Wickelhand. Die scheibenförmige Wickelhand dient zur Drahtführung und Aufrechterhaltung der Wickelzugspannung während des Wickelvorgangs. Dazu wird die Vorratsspule auf die Welle eines Servomotors montiert; die Zugkraft wird während des Wickelns über einen schwerkraftkompensierten Zugkraftsensor direkt gemessen. Mögliche äußere Einflüsse auf die

Zugspannung – beispielsweise durch das Übergeben der Wickelhand von einem Roboter auf den anderen – werden über eine spezifisch programmierte PID-Regelung in Echtzeit kompensiert. Ein Drehgeber gibt Auskunft über die verwickelte Leiterlänge (Abbildung 2).

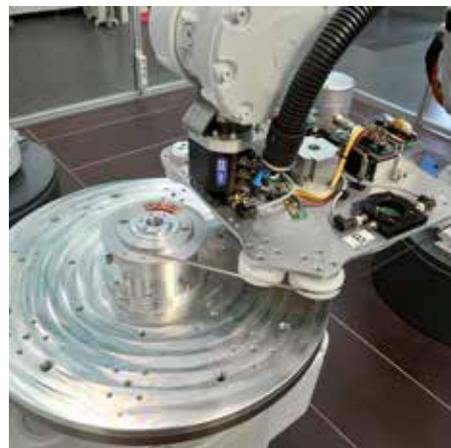


Abb. 3: Wickeln einer ersten scheibenförmigen Pancake-Spule.

Mit der fertiggestellten Anlage zum robotischen Wickeln wurde 2021 bereits eine erste scheibenförmige Pancake-Wicklung hergestellt. Dabei umkreiste einer der Roboter den ortsfest auf dem Werkstückpositionierer montierten Spulenkörper und wickelte den Draht lagenweise auf (Abbildung 3).

VAKUUM-DRUCK-IMPRÄGNIERUNG

Für die 2020 beschaffte Vakuum-Vergussanlage erstellte das ITEP alle notwendigen Betriebsunterlagen. Zur Erarbeitung einer Vergusstechnik für Spulen, die mit HTS-Bändern gewickelt werden, führte das Team 2021 die ersten Versuche durch. Dazu wurden Dummy-Pancake-Wicklungen mit Stahlband hergestellt und vergossen. Bei den Experimenten standen das Gieß- und Aushärteverhalten verschiedener Vergussmaterialien mit und ohne Zusatzstoffe sowie die Wahl einer geeigneten, möglichst mehrfach verwendbaren Vergussform im Mittelpunkt. Die Vakuumkammer der Anlage erlaubt Spulen bis zu einer Abmessung von ca. 1 m.

KÜHLKONZEPT: THERMOSIPHON MIT KRYOKÜHLER

Der Einsatz von HTS in energietechnischen Anwendungen erfolgt typischerweise im Temperaturbereich zwischen flüssigem Helium (4,2 K) und flüssigem Stickstoff (77 K). Dazu bietet sich die trockene Kühlung mit Kryokühlern an. Die Ankopplung des Kaltkopfs des Kühlers an das zu kühlende Objekt geschieht üblicherweise per Wärmeleitung über Kupfer-Massivmaterial. Eine weitaus größere Wärmeübertragung wird durch innovative Thermosiphons erreicht: Eine geringe Menge eines im Thermosiphon eingeschlossenen Kryogens überträgt Energie durch Stofftransport und Phasenübergänge. Der Verdampfer und der Kondensator aus Kupfer sind dabei mit dem zu kühlenden Objekt bzw. dem Kaltkopf verbunden. Das Kryogen, beispielsweise Neon, verdampft am zu kühlenden Objekt,



Abb. 4: Begonnener Aufbau des Thermosiphon-Teststands. Links ist der Kryostateinsatz mit Kaltkopf und Thermosiphon zu sehen, rechts das Bedienpanel der Verrohrung der Anlage.

strömt über ein Rohr zum Kondensator, wo es sich wieder verflüssigt, und fließt zurück zum Verdampfer. 2021 begann das ITEP mit dem Aufbau der zuvor konzipierten Thermosiphon-Demonstrationsanlage und erstellte das Bedienpanel für die Verrohrung (Abbildung 4).

Ferner wurden sämtliche mechanischen Bauteile konstruiert und in den Werkstät-

ten des KIT gefertigt. Für 2022 ist geplant, den Aufbau der Anlage zu vervollständigen und diese in Betrieb zu nehmen.

RÜCKBAUARBEITEN

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme der Ausbaustufe der Hochfeldexperimentieranlage HOMER II, die mit einem HTS-Einsatzmagneten nun Magnetfelder bis zu 26,5 T in einer kalten Bohrung von 68 mm Durchmesser bereitstellt, wurde die technisch veraltete Vorgängeranlage HOMER I überflüssig. Gleichzeitig bedurfte es einer kryogenfreien Testumgebung für größere strombeaufschlagte supraleitende Komponenten ohne Hintergrundfeld, die mit Kryokühlern gekühlt werden. Komponenten einer entsprechenden Testanlage mit Kryostat und Kühlvorrichtung wurden kurzfristig beschafft. Um Platz und Infrastruktur für diese Anlage bereitzustellen, wurde die HOMER I-Einrichtung komplett zurückgebaut. Der Kryostat der neuen Testanlage wird in der Grube des HOMER I-Kryostaten aufgebaut werden. Der HOMER I-Kryostat wird weiter eingesetzt werden – im Energy Lab 2.0 des KIT als Speicher für die Wasserstoffverflüssigung.

Kontakt: frank.hornung@kit.edu

HOCHSTROMKOMPONENTEN FÜR WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN UND FUSION

QUENCHUNTERSUCHUNGEN IN HTS FUSIONSLEITERN

Die bereits in den vorangegangenen beiden Jahren begonnenen Arbeiten zur Untersuchung des Quenchverhaltens in hochtemperatur-supraleitenden Kabeln für den Einsatz in zukünftigen Fusionsmagneten wurden 2021 im Rahmen einer internationalen Kooperation weitergeführt. Ziel des Projekts ist der experimentelle Test des Quenchverhaltens einer Probe unter fusionsrelevanten Bedingungen in der Supraleiter-Testanlage SULTAN in der Schweiz. Die vorgeschlagene Leiteranordnung wurde einem Test in der FBI-Anlage am KIT unterzogen. *Abbildung 5* zeigt den schematischen Querschnitt des Kabels sowie ein Foto einer Stirnseite der gefertigten und in der FBI-Anlage getesteten Probe.

Bei der Fertigung der in der FBI-Anlage getesteten Probe wurden alle relevanten Fertigungsschritte, die auch für die rund dreimal so lange SULTAN Probe benötigt werden, separat erprobt und durch sukzessive Einzelmessungen der Supraleiter nach

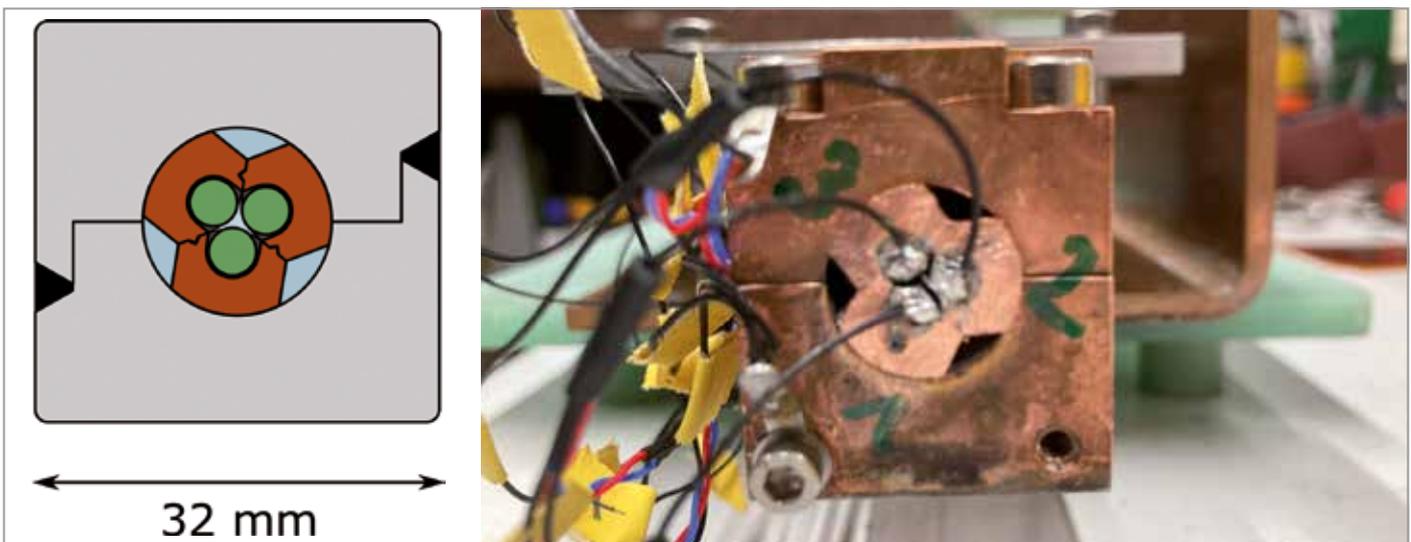


Abb. 5: Schematischer Querschnitt des Triplett-Leiters sowie ein Foto einer Stirnseite der gefertigten und in der FBI-Anlage getesteten Probe.

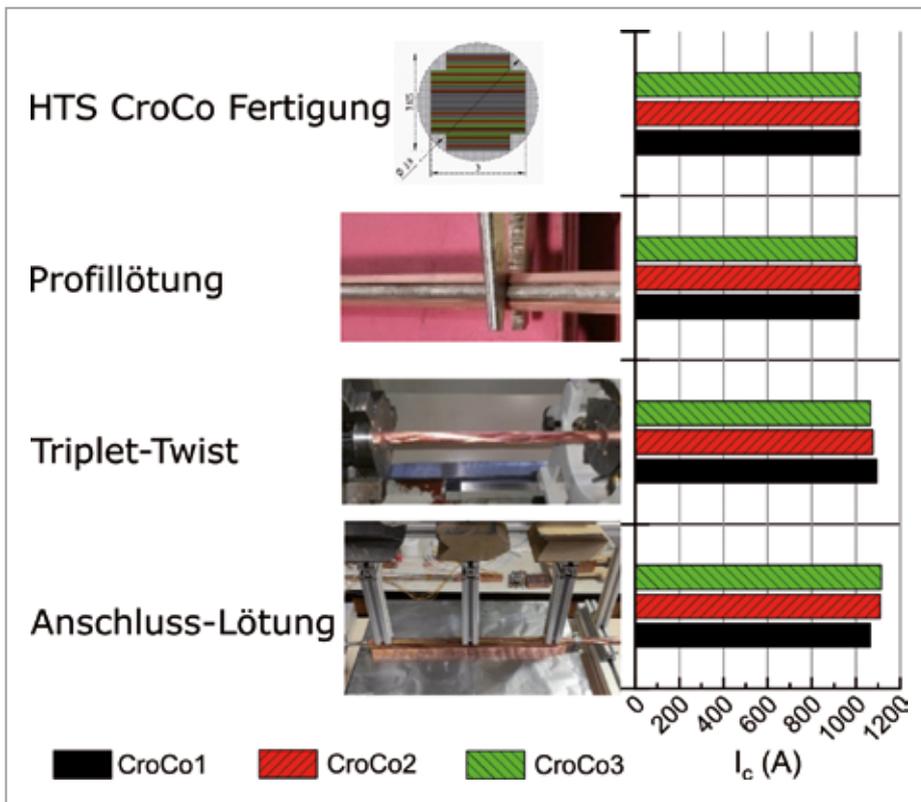


Abb. 6: Qualifikation der Fertigungsschritte durch Messung des kritischen Stroms der drei HTS-CroCo-Leiter des Triplets bei $T=77\text{ K}$.

jedem Fertigungsschritt überprüft. Die Fertigungsreihenfolge ist wie folgt: Fertigung der drei supraleitenden HTS-CroCo-Leiter, Einlöten dieser Leiter in Kupferprofile, Verdrillung der drei Leiter, Anbringen von elektrischen Anschlüssen und Kapseln des Leiters in ein längsgeschweißtes Stahlgehäuse. **Abbildung 6** zeigt die Ergebnisse der Messungen des kritischen Stroms der

Probe. Bei den einzelnen Fertigungsschritten trat keine Degradation des Leiters auf. Die Zunahme des kritischen Stroms entlang der Fertigungskette lässt sich durch das Hinzufügen und Vergrößern des Kupferquerschnitts bei jedem Schritt erklären.

Nach den erfolgreichen Qualifizierungsschritten wurde ein Test in der FBI-Anlage

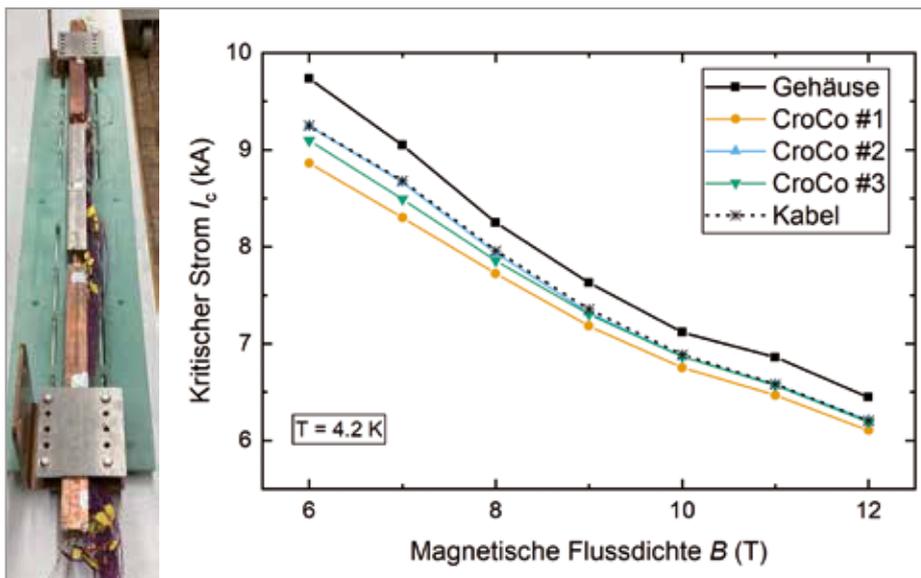


Abb. 7: Triplett-Probe beim finalen Vortest in LN_2 sowie Magnetfeldabhängigkeit der kritischen Ströme der drei HTS-CroCos bei $T = 4,2\text{ K}$.

bei $T = 4,2\text{ K}$ und Magnetischen Feldern bis 12 T durchgeführt. Ziel der Testkampagne war die Überprüfung des Probendesigns bei aus den Strömen und Feldern resultierenden hohen Lorentzkräften. Zudem wurden verschiedene Instrumentierungskonzepte und -anordnungen untersucht.

Abbildung 7 zeigt eine Probe nach dem finalen Vortest sowie die kritischen Ströme der drei Einzelleiter abhängig vom Magnetfeld. Basierend auf den erfolgreichen Vortests und der Testkampagne in der FBI-Anlage begann das ITEP anschließend mit der Fertigung und Montage der Probe für den Test in der Anlage SULTAN. Einige Meilensteine, wie die Fertigung und Charakterisierung der supraleitenden HTS-CroCo-Leiter, sind bereits erreicht, sodass die Fertigstellung der Probe Anfang 2022 zu erwarten ist.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu

HOCHSTROMKOMPONENTEN FÜR WASSERSTOFF

2021 erhielt das KIT den Zuwendungsbescheid für das vom BMBF geförderte Verbundprojekt ApplHy!. Damit hatte ein fokussiertes ITEP-Team den Projektantrag von zwölf Einzelpartnern erfolgreich in TransHyDE eingebracht, eines der drei Leitprojekte zur Nationalen Wasserstoffstrategie. **Abbildung 8** zeigt das einfache Logo des



Abb. 8: Logo des Verbundprojekts ApplHy!

Verbundprojekts. In dem Vorhaben mit einem Gesamtvolumen von über 15 Millionen Euro und einer Laufzeit von zunächst vier Jahren erforschen die Partner den Transport und die Nutzung von Flüssigwasserstoff (LH_2).

Damit der CO_2 -freie Energievektor Wasserstoff in der Form LH_2 eine angemessene Durchdringung der Energiesysteme erreicht, sind noch beträchtliche Entwicklungen und Implementierungen notwendig. Zusammen mit den Partnern adressiert das ITEP die folgenden Themen:

- effiziente Verflüssigung und Transport(-behälter)
- Sicherheit und Materialien
- Konzepte für LH_2 -nutzende elektrische Betriebsmittel der Energietechnik
- Sekundärnutzung der Tieftemperaturkälte und hybrider Energietransport mithilfe einer Pipeline für LH_2 und elektrische Energie – Letztere übertragen mit HTS-Kabeln

Hervorzuheben ist, dass das Projekt nicht nur Forschungs-, sondern auch Umsetzungsarbeiten umfasst, wobei besonders eine Versuchsplattform für die hybride Energieübertragungspipeline zu erwähnen ist. Daher arbeiten die beteiligten Forscherinnen und Forscher intensiv mit den anderen Forschungsfeldern und der Kryotechnik des ITEP sowie mit anderen Instituten des KIT wie ETI, IAM-WK und ITES zusammen. Flüssigwasserstoff bietet nicht nur eine große Reinheit und Energiedichte, sondern auch ein Temperaturniveau zum direkten Einsatz von HTS in elektrischen Betriebsmitteln wie Motoren, Generatoren, Kabeln oder Transformatoren ohne weiteren Kühlaufwand. Damit erreichen HTS die Kopplung von Elektrotechnik und Wasserstofftechnologie mit weiteren Effizienz- und Leistungsvorteilen.

Diese Synergie wird auch in den Teilbeiträgen der anderen Forschungsthemen deut-

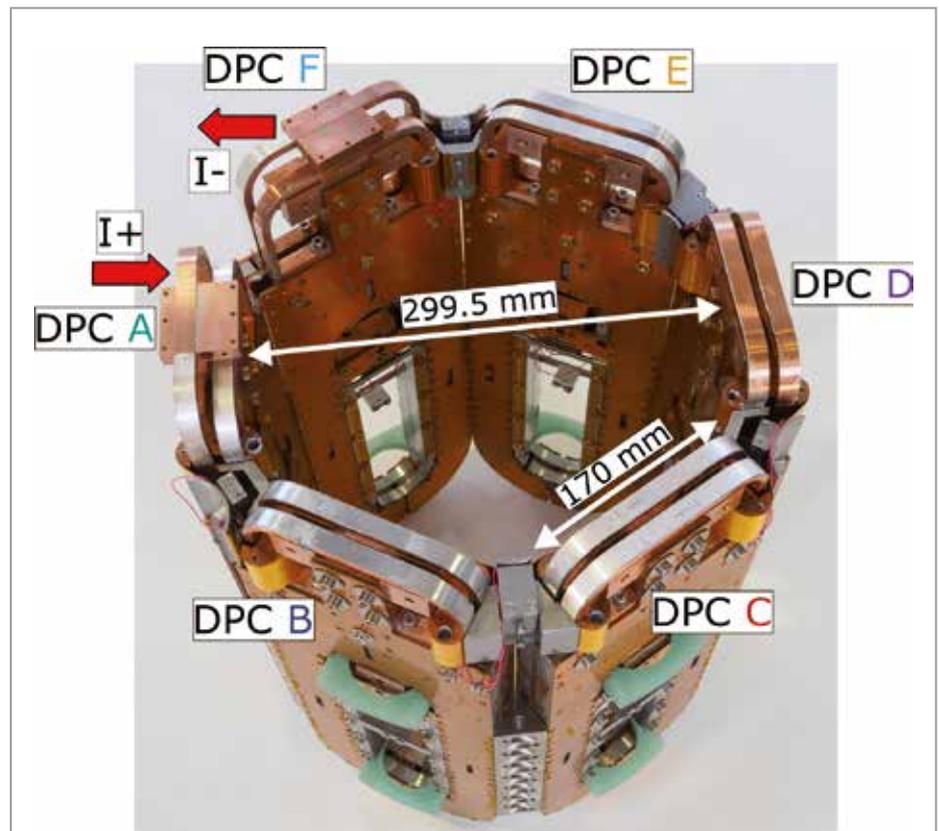


Abb. 9: Sechspoliges supraleitendes Spulensystem.

lich: Die neuen Anlagen der Spulen- und Magnettechnik, die Arbeiten an den Kabeln für die Fusion und auch die Auslegungen der rotierenden Maschinen stellen wertvolle Zuarbeiten dar.

Mit den vorhandenen Ressourcen und Teams sind die Aufgaben nicht vollständig zu bewältigen, deshalb arbeitet das ITEP – trotz der wegen der Pandemie erschwerten Bedingungen – an einer entsprechenden personellen Verstärkung, um sich diesem neuen strategischen Fokus adäquat widmen zu können. Gegebenenfalls können die aktuellen Arbeiten in Folgeprojekten weiter umgesetzt werden; avisiert sind zweimal drei Jahre.

Kontakt: michael.wolf@kit.edu,
tabea.arndt@kit.edu

ROTIERENDE MASCHINEN

SUPRALEITENDE GENERATOREN FÜR WINDTURBINEN

Der Einsatz supraleitender Feldspulen in direktangetriebenen Windturbinen ermöglicht mehr als eine Verdoppelung der Leis-

tungsdichte gegenüber konventionellen permanenterregten Generatoren. Die kompakten und leichten Maschinen bieten somit ein erhebliches Einsparpotenzial bei Transport und Installation von Windkraftanlagen höherer Leistungsklassen. Daher arbeitet das ITEP an Entwurf und Aufbau eines Generators mit supraleitenden Feldspulen als Technologiedemonstrator. Das sechspolige Spulensystem (Abbildung 9), bestehend aus zwölf einzelnen Pancake-Spulen, wurde erfolgreich in flüssigem Stickstoff bei einer Temperatur von 77 K getestet. Um eine erhöhte thermische und elektrische Stabilität zu erreichen, wird bei den Pancake-Spulen auf eine elektrische Isolation zwischen den Spulenwindungen verzichtet.

Das supraleitende Spulensystem wurde anschließend in das gesamte Generatorsystem integriert, um Tests bei Temperaturen unterhalb von 77 K durchzuführen. Die Kühlung wird durch ein kryogenfreies, leitungsgekühltes, zweistufiges Kühlsystem realisiert. Das supraleitende Spulensystem erreichte einen kritischen Strom von knapp 700 A bei einer Minimaltemperatur von 30 K und erfüllt somit die Anforderung an

einen Betriebsstrom von 450 A. Aus der im Zentrum der Spulen gemessenen magnetischen Flussdichte lässt sich weiterhin die geforderte alternierende Polbildung bei entsprechender Feldstärke ablesen (Abbildung 10). Zusätzliche Messungen bezüglich des Auf- und Entladeverhaltens sowie eine Dauerbestromung zeigten die prinzipielle Funktionsweise des Systems.

TESTSTAND FÜR HTS-ROTOREN

Im Rahmen einer strategischen Aufbauinvestition der HGF wurde für 2021 und die folgenden Jahre das Projekt HTS-Geno Testrig genehmigt. Ziel des Projekts ist, einen Teststand zur Entwicklung von Spulentechnik und Kühlung von großen supraleitenden Motoren und Turbogeneratoren aufzubauen. Dabei sollen die HTS-Spulen mithilfe eines Thermosyphon-Kreislaufs mit Neon auf 30 K abgekühlt werden. Der Betriebsstrom der supraleitenden Spulen beträgt bis zu 3 kA, die Spulen rotieren mit einer Rotationsgeschwindigkeit bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute. Das Team bewertete 2021 die aus einem Vorprojekt vorhandenen Konstruktionszeichnungen und Informationen. Die Kryokühler sind bestellt, die Infrastrukturmaßnahmen sind eingeleitet. Im Aufbau befindet sich das Schienensystem, das den gesamten 40 t schweren Aufbau, bestehend aus Wagen, Vakuumbehälter sowie Welle mit Motor und Kryotechnik, tragen muss. Die

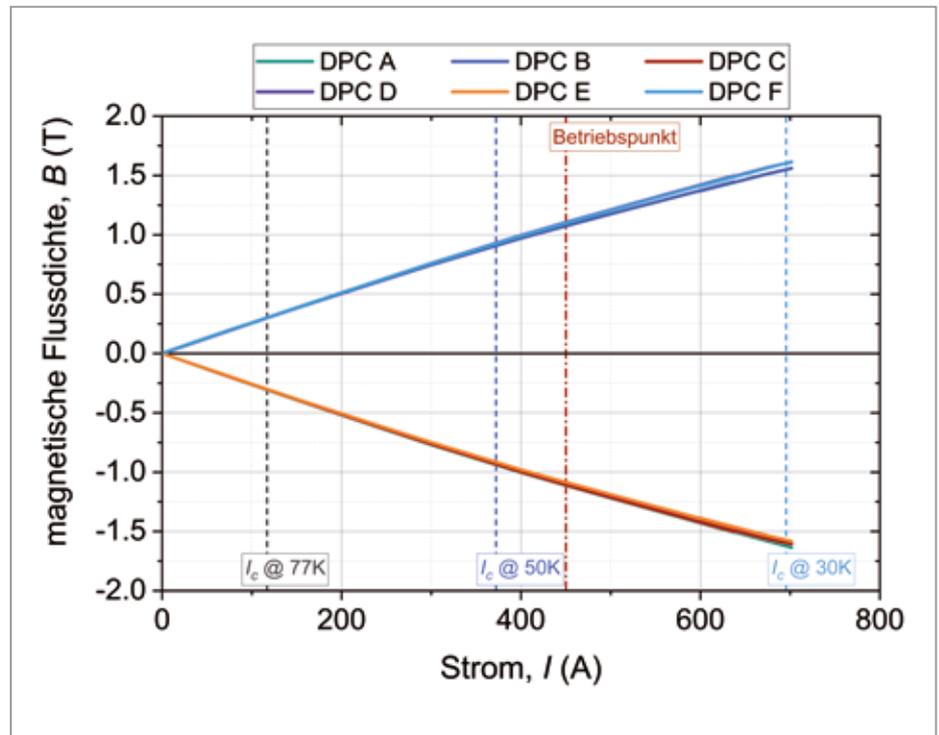


Abb. 10: Gemessene magnetische Flussdichte im Zentrum der Spulen abhängig vom Erregerstrom.

men sind eingeleitet. Im Aufbau befindet sich das Schienensystem, das den gesamten 40 t schweren Aufbau, bestehend aus Wagen, Vakuumbehälter sowie Welle mit Motor und Kryotechnik, tragen muss. Die

Konstruktion des Vakuumbehälters ist fast abgeschlossen (Abbildung 11) und kann 2022 beauftragt werden. Für eine flexiblere Nutzung des Testrings untersucht das Team derzeit Designänderungen des Rot-

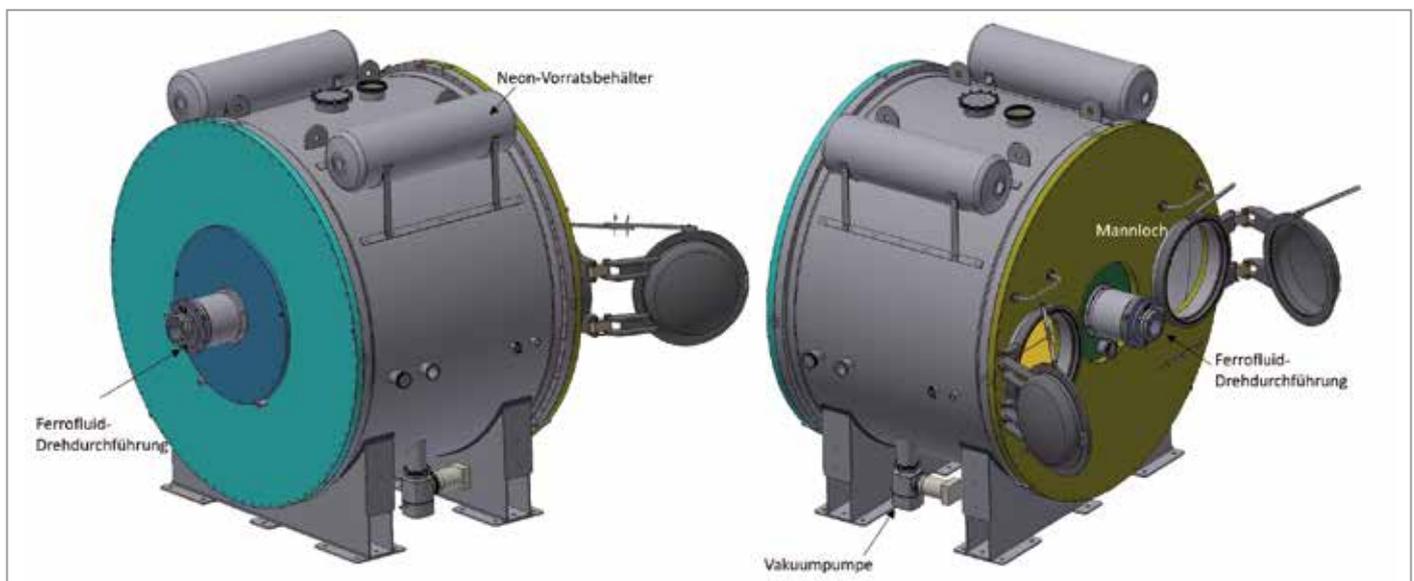


Abb. 11: Vakuumbehälter des HTS-Geno Testrings, Durchmesser 3,15 m, Länge 2,25 m, Gewicht ca. 16,2 t.

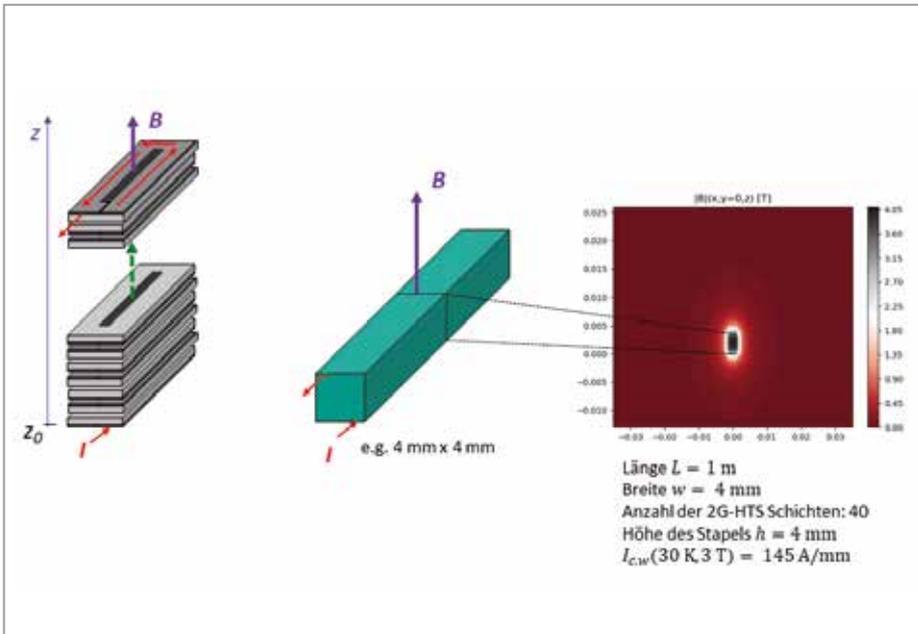


Abb. 12: Schema einer kompakten rechteckigen DUDA-Spule für rotierende Maschinen: Links der Stapelaufbau, in der Mitte ein Stapel als Komponente, rechts Magnetfelder in der skizzierten Ebene.

orballens, auf dem die supraleitende Spule befestigt ist.

ROTIERENDE MASCHINEN MIT DUDA-WINDUNGEN

Die ursprünglich für miniaturisierte Magnetspulen entwickelte runde Disk-Up-Down-Anordnung (DUDA) von Ebenen aus strukturierten 2G-HTS wurde auf rechteckige Anordnungen erweitert [1]. Bei konventionellen, normalleitenden Motoren werden die größten Leistungsdichten bei Synchronmaschinen mit Felderregungen durch Seltenerd-Permanentmagnete (PM) erreicht. Werden deren Rotoren durch Spulen mit gewickelten 2G-HTS-Bändern ersetzt, lässt sich zwar die Leistungsdichte weiter erhöhen, aber die Mindestanforderungen an die Krümmungsradien der Bänder und die Wickelköpfe selbst setzen den erzielbaren Polzahlen Grenzen: Die Polzahlen von 2G-HTS-Rotoren erreichen nicht die von PM-Rotoren. Das trifft sowohl für große Windkraftgeneratoren als auch für kompakte Antriebsmotoren zu. Da auch die

Nutzahl im Stator vorteilhaft an die Polzahl im Rotor gekoppelt ist, sind die Maschinen mit klassisch gewickelten Spulen limitiert.

Werden aber die konventionellen Permanentmagnete durch geeignete DUDA-Spu-

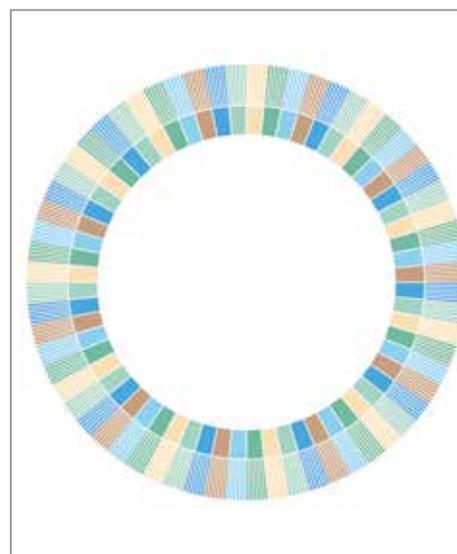


Abb. 13: Schematischer Querschnitt der Spulenarrangements in einem DUDA-Fahrzeugmotor zum Betrieb bei ca. 20 K (Flüssigwasserstoff).

len (Abbildung 12) ersetzt, lassen sich die Pole miniaturisieren und deutlich größere Polzahlen erreichen. Weiterhin wird auch der Raumbedarf für die Wicklungsköpfe extrem reduziert. Da für solche 2G-HTS-DUDA-Spulen das erreichbare Luftspaltmagnetfeld die Sättigungsfeldstärke von Eisenzähnen überschreitet, ist dann auch im Stator eine Luftspalt- oder genauer Luftzahlwicklung angemessen, die nur noch ein hinter den Statorspulen angeordnetes Eisenjoch aufweist. Für eine solche hochpolige Luftzahlmaschine wurde ein analytisches Näherungsmodell entwickelt, das in kurzer Zeit elektromagnetische Grobauslegungen solcher Maschinen erlaubt. Abbildung 13 zeigt eine Grobauslegung eines DUDA-Fahrzeugmotors, der – bei der Temperatur von ca. 20 K (Flüssigwasserstoff) – eine hervorragende Leistungsdichte aufweist. Diese Ansätze werden in Folgearbeiten weiterentwickelt.

[1] Arndt, T., et al. (2021). „New coil configurations with 2G-HTS and benefits for applications.“ Superconductor Science and Technology 34(9).

Kontakt: tabea.arndt@kit.edu

Parameter	Wert	Einheit
Leistung	7,3	MW
Geschwindigkeit	3000	Upm
Länge	0,300	m
Radius des Luftspalts	0,200	m
Anzahl der Polpaare	32	n.a.
Erregerstrom (bei ≈20 K)	400	A
Anzahl der Nuten	384	n.a.
Luftspaltradius	0,2	m

Highlight

Robotisches Wickeln von programmierten Trajektorien

Die Inbetriebnahme der Roboterzelle zum Wickeln von Spulen mit HTS stellt einen technischen Meilenstein in der Präparationstechnik dar.



Abb. 14: Präparation von ersten Spulen mit digitalem Zwilling und in der Hardware-Realität.

In den Vorversuchen wurde zunächst im digitalen Zwilling auf dem PC mit der Software RobotStudio der Wickelprozess vorab verifiziert. Dazu wird zum 3D-Abbild der Roboter in der Software über einen Import der Konstruktionsdaten die Wickelform hinzugefügt. Die gewünschte Trajektorie (3D-Ortskoordinaten) des Drahts wird dann in den Bewegungsanweisungen für die Roboter mathematisch parametrisiert.

Da Roboter im Allgemeinen zur Aufrechterhaltung eines großen Bewegungsspielraums bemüht sind, die Verdrehungen auf

den einzelnen Achsen zu minimieren, reicht es nicht aus, nur die Zielkoordinate der Wickelhand einzugeben. Dies würde im Lauf des Wickelprozesses zu einer plötzlichen Verdrehung des Roboterarms mit entsprechender Verdrillung des Wickeldrahts führen. Für Pick-and-Place-, Schweiß-, Lackier- oder Kleberoboter ist das akzeptabel und sogar wünschenswert, damit die Zuführungskabel und -schläuche entlang des Arms nur wenig verdrillt werden. Bei Supraleiterdrähten hingegen würde es zur Degradation oder zum Abriss führen.

Zur Vermeidung solcher Minimierungsstrategien müssen zusätzlich zur Ortskoordinate der Wickelhand die verschiedenen erlaubten Bewegungsspielräume der Achsen des Roboters definiert werden, und zwar in sogenannten Quaternionen, die wenig anschaulich, aber mathematisch definiert sind.

Weiterhin müssen die erlaubten dynamischen Bewegungsparameter wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen so angepasst werden, dass der Wickelprozess sowohl ruckfrei und sanft als auch

kompatibel zu den internen Steuerungen der Wickelhand abläuft.

Dazu wurde die grundsätzliche Basis erarbeitet. Ein besonderer Vorteil dieser robotischen Wickeltechnik ist, dass in der Ebene nicht nur Kreisspulen oder reine Rennbahnschulen, bestehend aus zwei Halbkreisen und zwei Geradenabschnitten, bewickelt werden können, sondern auch beliebige Lamésche Ovale durch einfache Änderung der mathematischen Trajektorienbeschreibung realisiert werden können. Diese planaren Spulenformen haben den Vorteil, dass beim Wickelprozess immer auch ein radialer Zug beibehalten wird, der dafür sorgt, dass keine lockeren Stellen im Wickel entstehen.

Diese Entwicklungen sind die Grundlage für die sich 2022 anschließenden Wickelarbeiten zu nichtplanaren (3D-)Spulen, wie sie beispielsweise in den Statoren von rotierenden Maschinen in konzentrierten Wicklungen, aber noch mehr in verteilten Wicklungen angewendet werden. Diese Spulen erfordern weitere mathematische Beschreibung und Programmiersorgfalt und werden in nachfolgenden Arbeiten adressiert. Die beschriebene Technologie ermöglicht auch die Präparation von HTS-Spulen für die Beschleunigermagnete, beginnend bei Dipolen mit einfachen Sattelspulen geometrien.

Diese robotische Wickeltechnik erfordert nicht für jede Anwendung und Spulenform die Herstellung einer geeigneten Wickelmaschine, sondern kann viele variable Aufgaben ausführen. Auch die Forschungsthemen Hochstromkomponenten für Wasserstoff sowie Rotierende Maschinen können von der vorgestellten Technologie profitieren.

Ergebnisse aus den Forschungsbereichen



Auf zu neuen Ufern – DIPAK geht los.

Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs

Koordination: Dr.-Ing. Christian Day

Im Forschungsfeld Technologien des Fusionsbrennstoffkreislaufs entwickelt das ITEP neuartige Technologien, um den Brennstoffkreislauf und die damit verbundenen Nachbarsysteme eines zukünftigen Fusionskraftwerks effizienter zu machen und dadurch sicherzustellen, dass der in situ erzeugte Brennstoff Tritium optimal ausgenutzt wird. Das Forschungsfeld deckt alle drei Schlüsseltechnologien des Brennstoffkreislaufs ab: Materieinjektion, Vakuumtechnik und Tritiumtechnologie.

Vor diesem Hintergrund haben sich im Forschungsfeld die folgenden aktuellen Themen herausgebildet:

- Vakuumtechnologie und Prozessintegration
- Strömung verdünnter Gase
- Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation

Die Arbeiten sind fest im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion verankert, das bis 2027 ein Konzeptdesign des Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO erarbeiten wird.

Auch das Jahr 2021 war stark geprägt von den Einschränkungen durch die Corona-Pandemie. Dennoch erzielten wir wie jedes Jahr äußerst beeindruckende Ergebnisse. Zu verdanken ist dies nicht nur dem außergewöhnlichen Engagement der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sondern auch dem vorbildlichen Einsatz des Technikerteams. Darauf sind wir ausgesprochen stolz.

VAKUUMTECHNOLOGIE UND PROZESSINTEGRATION

Das Forschungsthema Vakuumtechnologie und Prozessintegration adressiert alle vakuumtechnischen Fragen rund um eine Fusionsanlage und entwickelt einen integrativen Ansatz für ihre Beschreibung mithilfe eines Brennstoffkreislaufsimulators für DEMO. Die Arbeiten decken auch Vakuumtechnologien für andere Großanlagen in der Fusion ab, wie für die europäische Neutronenquelle IFMIF-DONES oder die sich derzeit im Bau befindlichen Fusionsreaktoren JT-60SA in Japan und DTT in Italien.



Abb. 1: Design der Kryopumpe für JT-60SA (links) und erste Komponenten in der Herstellung (rechts).

Der Bereich Vakuumtechnik des ITEP arbeitet seit vielen Jahren mit dem Team des Tokamaks JT-60SA in Japan zusammen, der 2022 in Betrieb gehen wird. Nach einer ersten Experimentierkampagne wird die Maschine 2023 wieder geöffnet und mit weiteren Einbauten komplettiert werden. Dazu gehört ein leistungsfähiges Kryopumpensystem mit neun baugleichen Kryopumpen, das direkt in den Divertor integriert werden wird. Das ITEP wurde beauftragt, dafür das komplette Design zu entwickeln, die Herstellung in der Industrie zu begleiten und die qualitätskonforme Ausführung sicherzustellen.

Abbildung 1 zeigt links das finale Design der Kryopumpe. Es folgt dem am Institut entwickelten bewährten Kryosorptionspumpenkonzept: In der Abbildung zu sehen ist der thermische Schild. Die Kryoflächen sind modular aus hydrogeformten Panels aufgebaut, zwei Stück pro Pumpenflügel. Die ersten Halterungen, zu sehen in Abbildung 1 rechts, sind bereits hergestellt und nach Japan geliefert.

Zur Finalisierung des Herstellungsdesigns mussten viele Designänderungen eingear-

beitet werden. Besonders die komplexen Schweißungen erwiesen sich als Herausforderung für den Hersteller.

Für die Materialtestanlage IFMIF-DONES, die in Granada/Spanien gebaut wird, führte der Institutsbereich umfangreiche Vakuummodellierungen aus. DONES ist ein Beschleuniger, der an einem Flüssiglithium-Target ein fusionstypisches Neutronenspektrum erzeugt, mit dem sich Materialien für Anwendungen in der Fusion prüfen lassen.

2021 wurden umfangreiche Modellierungen zur Argon-Gasinjektion Richtung Target, im Abstand von 90 m von der Quelle, vorgenommen. Der Aufbau eines Totaldrucks von mindestens 10^{-4} mbar ist erforderlich, um eine Verdampfung des Lithiums an der frei fließenden Oberfläche zu unterdrücken. Die Rechnungen zeigten, dass für das vorgesehene Pumpensystem längs des Strahlengangs mit Turbomolekularpumpen, Kryopumpen, NEG- und Ionenzerstäuber-pumpen ein Injektionsgasstrom von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar l/s nötig ist, um die Anforderungen zu erfüllen. Abbildung 2 zeigt das Partialdruckprofil, das sich dabei einstellt.

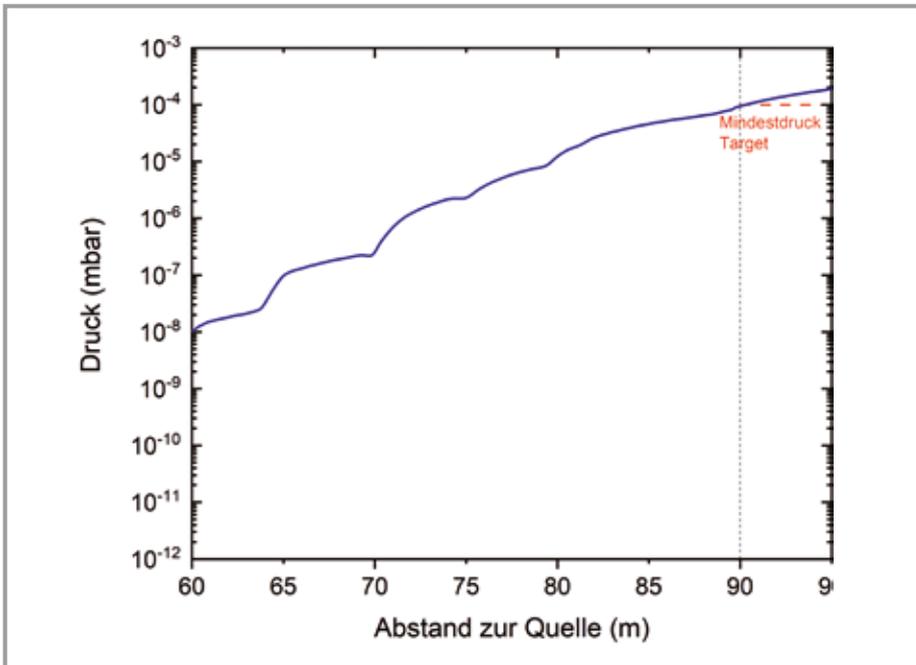


Abb. 2: Druckprofil zum Flüssiglithium-Target am IFMIF-DONES Beschleuniger.

Zwischen 90 m und etwa 60 m definiert Argon den Totaldruck, näher zur Quelle wird der Argonanteil durch die Gaslast aus der Ausgasung maskiert.

Eine weitere Vakuumtechnologie, die an verschiedenen Stellen des Brennstoffkreislaufs eingesetzt wird, basiert auf Gettermaterialien (NEG). Die auf diesem Gebiet führende Firma SAES Getters hat in den vergangenen Jahren ein neues Material mit dem Verkaufsnamen ZaO entwickelt, das in Form von Scheiben mit einem Durch-

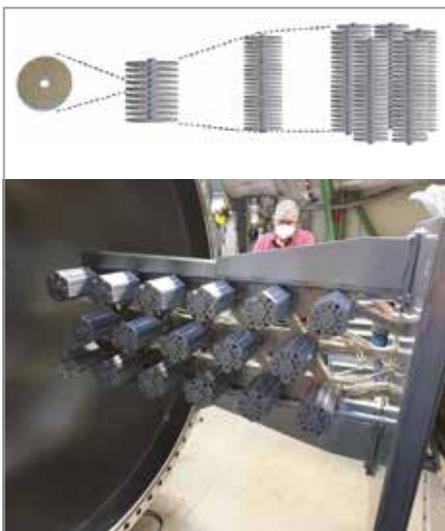


Abb. 3: Vom Kleinen zum Großen: NEG-Scheibe mit einem Durchmesser von 25 mm (oben links), NEG-Kartusche mit 270 Scheiben (oben rechts), NEG-Testpumpe beim Einbau in TIMO mit 4.590 Scheiben (unten).

messer von 25 mm hergestellt wird. Darauf aufbauend wurde 2020 eine Testpumpe mit mehr als 4.600 Einzelscheiben gebaut und in der Versuchsanlage TIMO installiert. 2021 wurde die Pumpe detailliert gemessen (Abbildung 3).

Aufbauend auf den Messergebnissen, wurde dann mit Monte-Carlo-Simulationen das Saugvermögen der großen Pumpe auf das Saugvermögen der einzelnen Scheibe zurückgerechnet. Damit kann nun in den nächsten Jahren das Design einer sehr großen Pumpe in der Größenordnung von einer Million Scheiben entwickelt werden, wie sie für die Neutralteilchenheizung in der Fusion benötigt wird.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten 2021 war die Entwicklung der Vakuumsysteme für DTT, eine neue Fusionsmaschine in Italien (Abbildung 4). DTT soll die Divertorlösung von DEMO entwickeln und demonstrieren; der Betrieb läuft ohne Tritium. Für das Pumpen des DTT-Divertors wurden zwei mögliche Lösungen gefunden: basierend auf NEG-Pumpen mit handelsüblichen Kartuschen (Abbildung 3) und basierend auf maßgeschneiderten Kryopumpen. Beide Lösungen können die Pumpanforderungen erfüllen, aber Kryopumpen liefern die höchsten Werte für das effektive Saugvermögen. Außerdem sind die Investitionskosten für ein Kryopumpensystem wesentlich geringer,

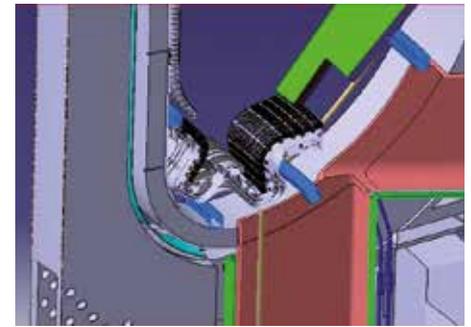


Abb. 4: Der DTT-Divertor mit den potenziellen Anschlusskanälen (rot) zur Unterbringung der Vakuumsysteme.

und Kryopumpen bieten einen großen Vorteil beim Pumpen der Edelgase, da NEG-Pumpen ein zusätzliches System zum Pumpen dieser Gase benötigen. Im nächsten Jahr wird die vorgeschlagene Pumplösung weiter detailliert und an die vorhandene Infrastruktur angepasst werden. Das Design der DTT-Vakuumpumpen wird über mehrere Jahre einen Arbeitsschwerpunkt im Forschungsthema Vakuumtechnik darstellen.

Auch für die derzeit entstehende Fusionsanlage SPARC in den USA entwickelten wir ein Konzeptdesign zum Pumpen des Divertors. Hinter SPARC steht das private Unternehmen Commonwealth Fusion Systems, das einen alternativen Weg zum Fusionskraftwerk entwickelt. Er basiert auf sehr hohen magnetischen Feldern und der konsequenten Ausnutzung von Hochtemperatur-Supraleitern, was potenziell zu einer besonders kompakten Bauweise führt. Entsprechend fanden wir zusammen mit der Industrie eine Vakuumlösung, die sich im Wesentlichen auf kommerziell verfügbare Kryopumpen stützt; diese müssen allerdings tritiumfest umgebaut werden.

Für die systematische Untersuchung thermischer Gasabgaberraten von Materialien im Vakuum an der Testanlage OMA (Outgassing Measurement Apparatus) wurde mit der Messung von einfachen Baustählen begonnen. Diese sind für die Fusion relevant, besonders aber auch für das Design des neu in Europa geplanten Gravitationswellendetektors der dritten Generation, **Einstein Telescope** (ET). Dieser nutzt Laserinterferometer, in deren 10 km langen Strahlrohren für die gewünschte Sensitivität ein Totaldruck von 10^{-10} mbar erreicht werden muss. Einstein Telescope wird eines der größten

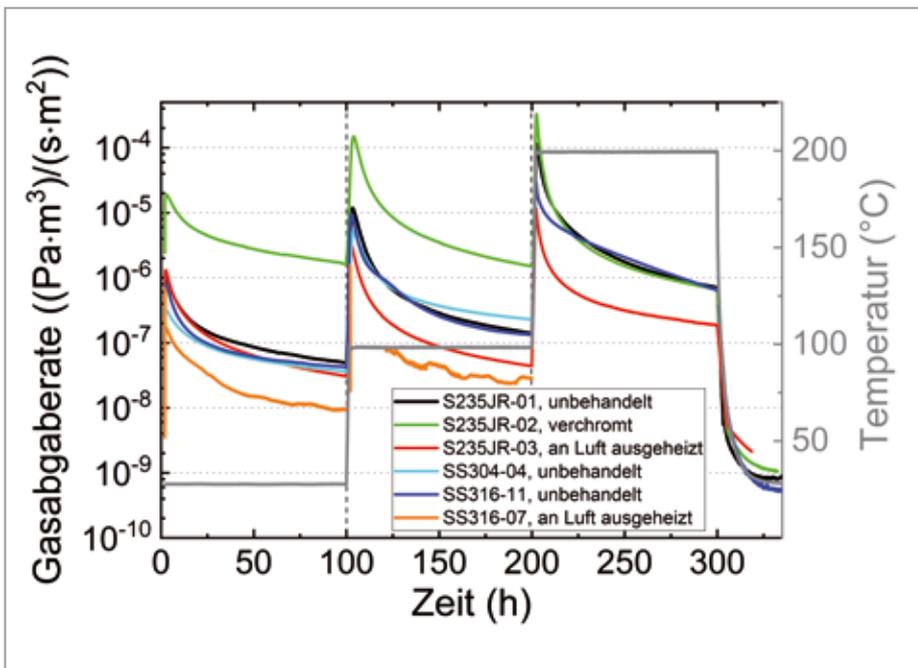


Abb. 5: Gemessene Ausgasraten von Stahl S235JR im Vergleich mit Edelstahl.

Ultrahochvakuumssysteme der Welt sein. Bei solchen Größenskalen ist der wegen seines guten Ausgasungsverhaltens üblicherweise verwendete Edelstahl als Wandmaterial aus Kostengründen keine Option.

Erste Ergebnisse der Untersuchungen in OMA für unbehandelten, verchromten und an Luft ausgeheizten Stahl S235JR im Vergleich zu Edelstahl 304 und 316L sind in [Abbildung 5](#) dargestellt. Für den unbehandelten Stahl (nach einem In-situ-Ausheizen) wurden nur leicht höhere Gasabgaberraten als für die Edelstähle gefunden, wohingegen die verchromte Probe deutlich schlechter abschnitt. Durch vorheriges Ausheizen der Stahlprobe bei 400 °C für 130 h an Luft wurde die Ausgasrate nach 100 h bei Raumtemperatur noch einmal um den Faktor 1,5 gesenkt. Diese ersten Ergebnisse sind vielversprechend.

Eine erste Übertragung auf die Dimensionen von ET und die Abschätzung des mindestens erforderlichen Saugvermögens zeigte, dass voraussichtlich weitere Vorbehandlungen des Stahls erforderlich sein werden und/oder das aktuell vorgesehene Pumpkonzept überdacht werden muss. Dazu werden in Zukunft weitere Untersuchungen von Stahl mit verschiedenen Vorbehandlungen, wie Ausheizen im Vakuum, sowie anderer relevanter Materialien für ET an OMA durchgeführt. Außerdem werden

Methoden zur Reduktion besonders auch der partialen Ausgasraten von Wasser und Kohlenwasserstoffen entwickelt.

Kontakt: christian.day@kit.edu

STRÖMUNG VERDÜNNTER GASE

Zur korrekten Auslegung von komplexen Vakuumssystemen wie im Fusionsbrennstoffkreislauf ist es unerlässlich, verdünnte

Gasströmungen quantitativ zu berechnen. Dies geschieht exakt durch Lösen der Boltzmann-Gleichung, welche die Strömung im gesamten Bereich der Verdünnung beschreibt. Allerdings ist die Lösung dieser Gleichung für realistische Anwendungen ausgesprochen aufwendig – etwa angesichts komplexer Geometrien oder Gasmischungen. Der Forschungsfeld Vakuumtechnik des ITEP verfolgt dazu zwei verschiedene Ansätze: einen mit dem DSMC-Algorithmus, der stochastische Methoden anwendet, und einen mit deterministischen Verfahren (DVM), welche die Gleichung unmittelbar lösen.

2021 wurde ein großer Durchbruch in der Codebeschleunigung erzielt. Dazu wurde der Code, der bisher auf CPU-Prozessoren parallelisiert war (MPI-Technologie), alternativ durch die Verwendung von Grafikkarten parallelisiert (GPU). Dafür wurde als Benchmark der Fall des Teilchenabtransports im DEMO-Divertor mit parametrisch variiert Pumpwahrscheinlichkeit gerechnet. [Abbildung 6](#) zeigt die zugrunde

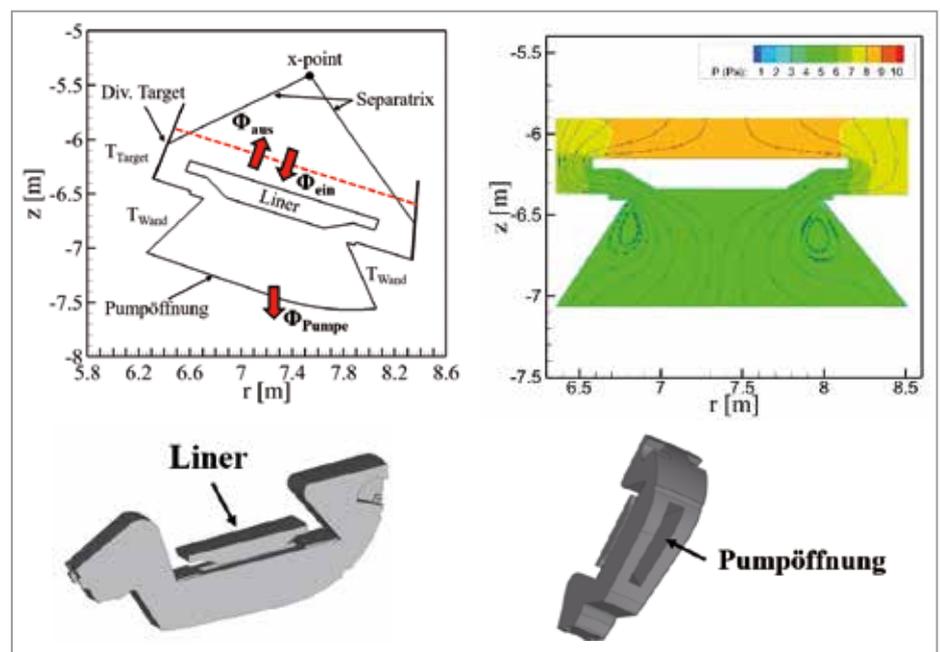


Abb. 6: Benchmarkcase für den Vergleich der Parallelisierung: Pumpwahrscheinlichkeit mit 0,1 angenommen, Druck an der Systemgrenze (rot gestrichelt) 10 Pa.

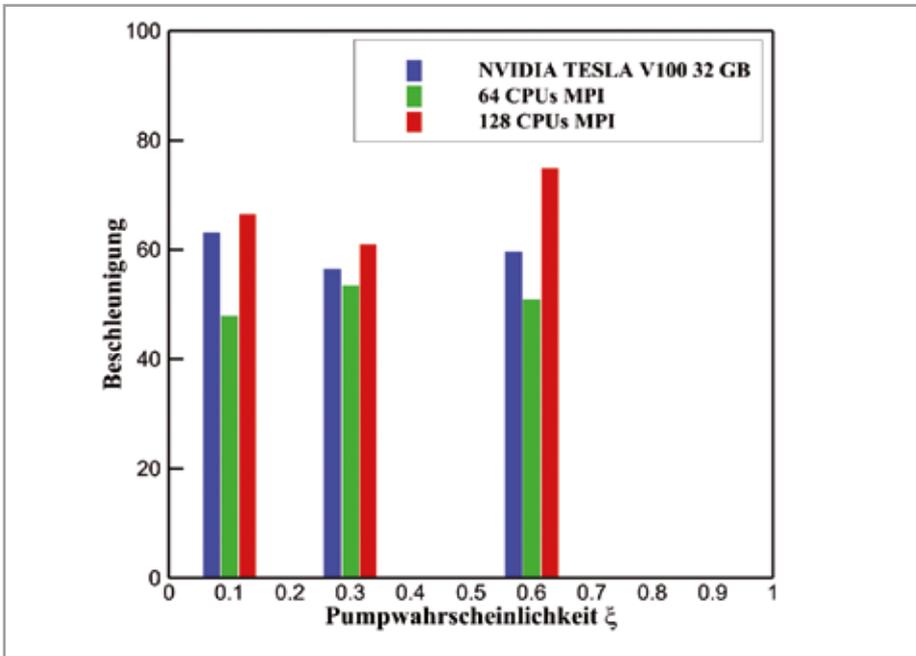


Abb. 7: Vergleich der Beschleunigungen durch Parallelisierung mit verschiedenen Rechnerarchitekturen.

liegende Geometrie und die sich einstellende Druckverteilung.

Abbildung 7 zeigt im direkten Vergleich der Rechenzeit die Beschleunigung gegenüber dem nichtparallelisierten Prozess, nämlich dass eine GPU-Einheit (NVIDIA V100, 32 GB Memory, 7,8 TFLOPS) so viel bewirkt wie etwa 100 parallele CPUs (2 x 24 Core Intel Xeon 8160 CPU [Skylake] 2,10 GHz). Damit können auf beiden Parallelisierungskonzepten vergleichbare Rechenzeiten realisiert werden. Der Bedarf an Hard-

ware ist allerdings für GPUs um zwei Größenordnungen kleiner. Das bedeutet für die Dauer der am ITEP üblicherweise durchgeführten Rechnungen, dass sich der bisher benötigte Zugang zum Supercomputer MARCONI in Italien, der oft mit langen Wartezeiten der Rechenjobs verbunden ist, mittelfristig durch eine am Institut angesiedelte Rechnerstruktur ohne merkliche Leistungseinbußen ersetzen lässt.

Eine weitere anspruchsvolle Anwendung der gasdynamischen Codes ist die Simulation der Teilchenabfuhr im Stellarator W7-X. Dafür wurden 2021 zum ersten Mal umfangreiche Rechnungen in 3D durchgeführt. Abbildung 8 zeigt deutlich, dass sich die Divertorgeometrie nicht in 2D abbilden lässt. Das DSMC-Verfahren zur Lösung der Boltzmann-Gleichung wurde wohl noch nie für so eine komplexe Geometrie ange-



Abb. 8: Veranschaulichung der zu modellierenden Flächen im Plasmagefäß von W7-X.

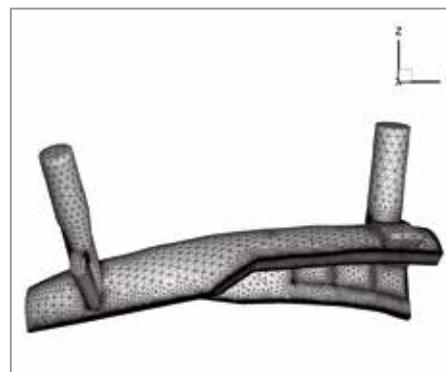


Abb. 9: Rechengitter eines W7-X Divertors.

wandt. Die Rechnungen dienen zur Optimierung des Plasmabetriebs mit neuen Kryopumpen, die 2022 angeschlossen werden.

Abbildung 9 zeigt das extrahierte Modell mit dem Rechengitter. Deutlich zu sehen sind die Pumpstützen, an denen die Vakuumpumpen angeschlossen werden. Die Rechnungen sind noch nicht abgeschlossen; es wurde aber bereits deutlich, dass die Einflüsse von Einbauspalten und Schilfen quantifiziert werden können. Diese Zusammenarbeit wird in den nächsten Jahren intensiv weiterlaufen.

Kontakt: stylianos.varoutis@kit.edu

VAKUUMHYDRAULIK UND WASSERSTOFFSEPARATION

Das Forschungsthema Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation umfasst sämtliche Arbeiten, die sich mit dem Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, vor allem Flüssigmetallen, in Maschinen und Prozessen unter Vakuum beschäftigen. Dementsprechend arbeitet der Institutsbereich Vakuumtechnik des ITEP auch an Prozessen für den Umgang mit diesen Arbeitsmitteln, wie Aufreinigung und Prozessierung von Quecksilber, sowie an der Entwicklung zugehöriger analytischer Verfahren. Das Referenzkonzept für das Torusvakuumsystem des europäischen Demonstrationsfusionskraftwerks DEMO sieht drei verschiedene Pumptypen vor. Beim ersten Typ handelt es sich um eine Metallfolienpumpe, die das Gas nicht nur komprimiert, sondern auch den Großteil des unverbrannten Brennstoffs im Abgas separiert. Stromabwärts schließt sich dann eine Kombination aus quecksilberbasierten Hoch- bzw. Grobvakuumpumpen an. Alle drei Pumptypen werden im Forschungsfeld Vakuumtechnik parallel bis zur Prototypstufe entwickelt.

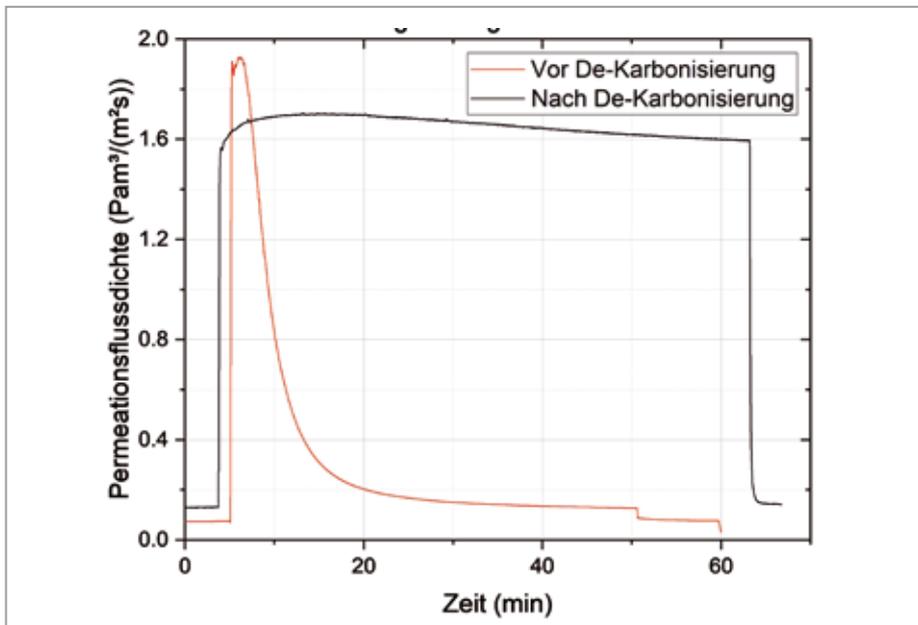


Abb. 10: Eine Dekarbonisierung der Folie ist Voraussetzung zum Erreichen konstanter Teilchenflussdichten über eine lange Zeit.

Um gepumpt werden zu können, muss der Wasserstoff in der Metallfolienpumpe in einen energetischen Zustand überführt werden. Für diese Aufgabe wird eine Mikrowellenplasmaquelle verwendet, die einen hohen Energetisierungsgrad erreichen soll. Nachdem im vorherigen Jahr bereits eine Modifikation der Plasmaquelle zur Energetisierung des Wasserstoffs vorgenommen wurde, um die Produktion metallischer Unreinheiten im Plasma zu vermeiden, wurde 2021 ein weiterer großer Schritt in Richtung langfristig hoher Permeationsflüsse gemacht. [Abbildung 10](#) zeigt den Vergleich zweier Permeationsflussmessungen in der Versuchsanlage HERMESplus bei gleichen experimentellen Bedingungen (20 Pa, 900 °C Niob-Folientemperatur und 2,4 kW Plasmaleistung). Der Unterschied der Verläufe wurde durch eine Dekarbonisierung der Metallfolie erzielt. Dabei wird Kohlenstoff, der unterhalb der Oberfläche im Metall die Diffusion des für Superpermeation essenziellen Sauerstoffs hemmt, in Form von CO bei hohen Temperaturen (ca. 1500 °C) ausgegast.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten in HERMESplus wurde eine weitere Aktivität gestartet, die sich mit dem mechanischen Aufbau und Aspekten der Herstellbarkeit



Abb. 11: Versuchsaufbau NEMESIS.

einer Metallfolienpumpe im technischen Maßstab beschäftigt. Dabei wird untersucht, wie modular die Pumpe gestaltet werden kann. So müssen zum Beispiel die Foliensegmente erstens montierbar sein, zweitens vakuumdicht sein und drittens das gleichmäßige Heizen der Folie durch einen direkten Stromfluss durch die Folie ermöglichen.

Stromabwärts der Metallfolienpumpe sollen lineare Quecksilberdiffusionspumpen verwendet werden. Das Arbeitsprinzip von solchen Pumpen beruht auf der Impulsübertragung von Quecksilberdampf, der in Düsen auf Überschall beschleunigt wird, an die zu pumpenden Gasteilchen. Zum besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in der Düse wurde 2021 ein neuer Versuchsaufbau realisiert ([Abbildung 11](#)), der 2022 im Quecksilberlabor in Betrieb gehen wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt im Betrieb von Quecksilberpumpen ist die Reduktion der Rückströmung. Dafür müssen optisch

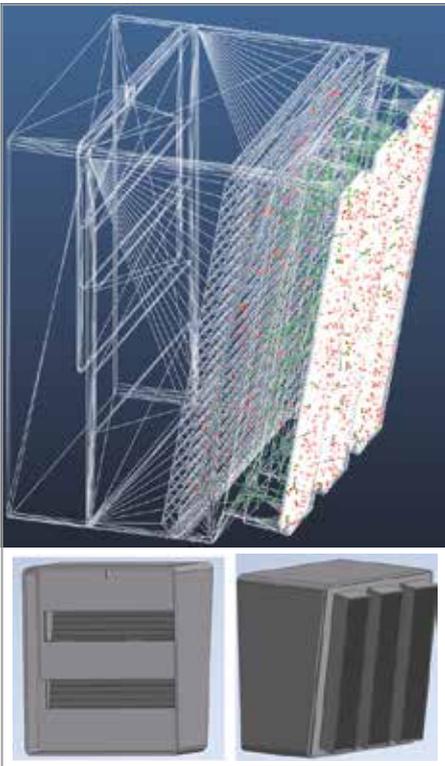


Abb. 12: Design (oben) und Modellierung (unten) eines Baffles.

dichte, gekühlte Baffles entwickelt werden. Abbildung 12 zeigt einen ersten Entwurf für diese Komponente (oben) sowie die Teilchentrajektorien bei der Modellierung der Durchtrittswahrscheinlichkeit in einem Monte-Carlo-Modell (unten).

Für die Bereitstellung des Brennstoffs in der gewünschten Zusammensetzung ist es erforderlich, das D:T-Verhältnis genau äquimolar einzustellen. Dazu bedarf es einer Technologie, die innerhalb der vorhandenen Wasserstoff-Isotopologen Konzentrationsverschiebungen einstellen und das für die Plasmareaktion ungünstige H extrahieren kann. Im Forschungsthema Vakuum wurde dazu ein neues Verfahren erarbeitet, das auf dem Konzept der zyklischen Temperaturwechselabsorption (TSA) an Metallen mit gegenläufigem Isotopeneffekt beruht. Das Gasgemisch wird dabei portionsweise in einem semikontinuierli-

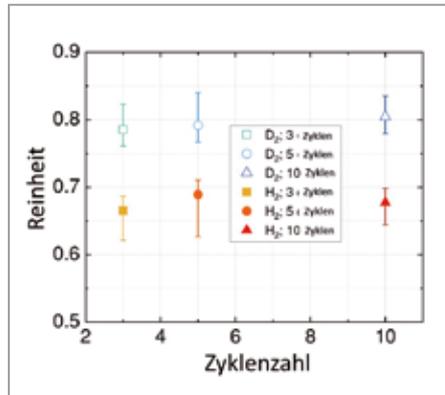


Abb. 13: Anreicherung der Wasserstoffisotope im TSA-Prozess.

chen Prozess zwischen zwei Kolonnen zyklisch hin und her bewegt, wodurch nach einer bestimmten Zykluszahl eine Anreicherung der Isotope an den jeweiligen Enden der Kolonne erfolgt. 2021 wurde

dieses Verfahren zum ersten Mal an der dafür gebauten Anlage HESTIA demonstriert. Abbildung 13 zeigt ein Schlüsselergebnis, nämlich die Abhängigkeit der Anreicherung von der Zykluszahl. Dabei zeigte sich, dass ein H₂-D₂-Gemisch der Ausgangszusammensetzung 42 Prozent/58 Prozent in einer einzigen Trennstufe bereits nach drei Zyklen über 65 Prozent (H₂) bzw. über 75 Prozent (D₂), nahe an dem vom Material vorgegebenen Gleichgewichtswert, angereichert wurde. Damit kann die Gesamtdauer dieses Prozesses in DEMO (bestehend aus mehreren Stufen) deutlich herabgesetzt werden.

Die in diesem Forschungsthema laufenden Entwicklungsarbeiten qualifizieren im Rahmen einer systematischen Technologieentwicklung neue und innovative Verfahren

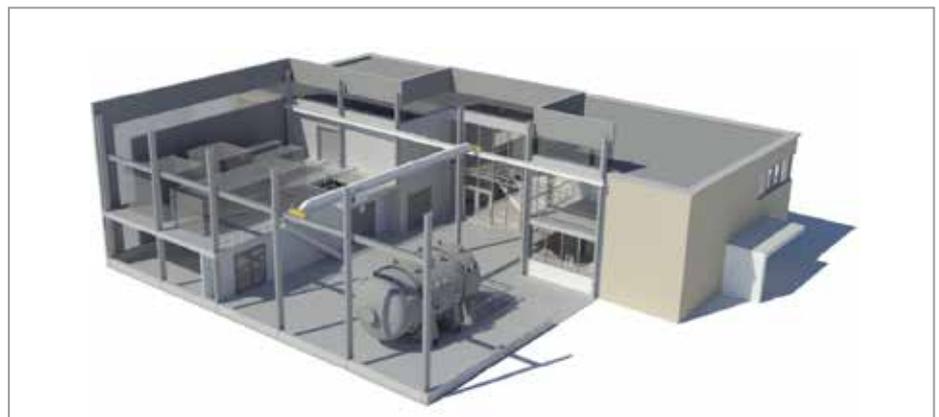


Abb. 14: Architektur des DIPAK-Gebäudes (oben) und Übersicht über dessen wichtigste Forschungsinfrastrukturen (unten).

zur Anwendung im Brennstoffkreislauf von DEMO. In den nächsten rund drei Jahren werden alle am Institut geleiteten Neuentwicklungen (Metallfolienpumpe, Quecksilbervakuumpumpen, Temperaturwechselprozess) zur Prototypreihe führen. Die nächsten logischen Schritte sind dann der Bau und der Test der einzelnen Prototypen in ihrem Zusammenspiel im Brennstoffkreislauf. Um die Dynamik des Gesamtprozesses korrekt abbilden zu können, ist es erforderlich, die beiden ersten der drei Brennstoffkreislaufloops komplett zu realisieren, inklusive der Materiezufuhr über Pelletinjektion. Dies erfordert eine eigene Testumgebung. Nach einer mehrjährigen Planungs- und Beantragungphase wurde 2021 dazu das Projekt DIPAK (Direct Internal Recycling Integrated Platform Karlsruhe) vom Präsidium genehmigt sowie vom Senat und Aufsichtsrat befürwortet. Die Förderung der Anlage durch das Programm EUROfusion liegt ebenso vor wie die Zusage durch das Helmholtz-Programm Energie. Das Dokument für die bauliche Beantragung des neuen DIPAK-Gebäudes am Campus Nord (Abbildung 14) befindet sich bereits in Iteration mit der entsprechenden KIT-Abteilung (Planen und Bauen, PB). Damit wurde das Projekt DIPAK offiziell angetrieben.

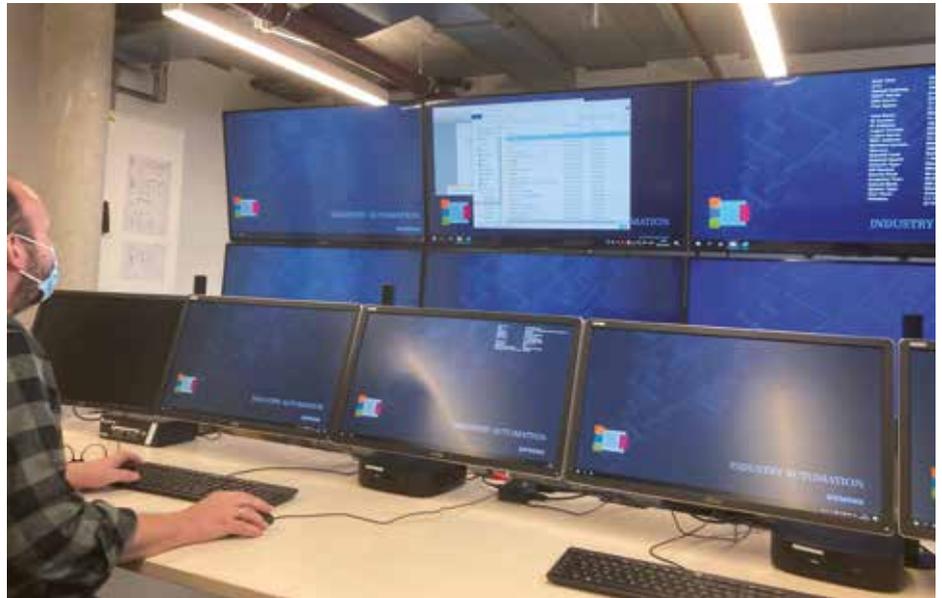


Abb. 16: Blick in den Leittechnik-Entwicklungsraum für DIPAK.

Auch für den komplexen zentralen Testbehälter von DIPAK (Abbildung 15), der den Torus eines zukünftigen Fusionskraftwerks simulieren wird, wurden die Herstellungszeichnungen bereits erstellt und durch den TÜV abgenommen.

Hinsichtlich der auf Siemens PCS7 basierenden Leittechnik für DIPAK, die hochkomplex ist und vor dem Umzug in das DIPAK-Gebäude komplett aufgebaut und er-

probt werden muss, wurden die Arbeiten ebenfalls bereits begonnen. Dies bedeutete zunächst den Aufbau der Steuerungshardware und der im 1:1-Maßstab (Abbildung 16) in Gebäude 416. Die ersten Komponenten zur Integration in die Leittechnik wurden bereits eingebaut, nämlich Atom-Adsorptions-Spektrometer und Dräger-Sensoren.

Kontakt: thomas.giegerich@kit.edu



Abb. 15: Der zentrale Testbehälter in DIPAK.

Highlight

Das Tritiuminventar passt

Vor sieben Jahren startete die Entwicklung des Brennstoffkreislaufs von DEMO. Damals nahm die Forschung an, eine einfache Extrapolation des Brennstoffkreislaufs von ITER wäre bereits eine gute Lösung für DEMO.

In einer ersten Analyse erkannten die Forschenden am ITEP jedoch, dass dies zu einem inakzeptabel großen Tritiuminventar führen würde. Erste Abschätzungen führten damals auf deutlich mehr als 10 kg Tritium, was angesichts der vorhandenen Reserven und der damit verbundenen Sicherheitsaspekte nicht vertretbar ist. Die Lösung dieses damals unlösbar scheinenden Problems und die Demonstration der technischen Umsetzung ist heute die Kernaufgabe im Forschungsfeld Technologien des Brennstoffkreislaufs.

In einem ersten Schritt wurde daran gearbeitet, die Komponenten des Brennstoffkreislaufs so zu modifizieren, dass die Tritiuminventare deutlich kleiner werden. Dies bedeutete zunächst einen Wechsel

von der diskontinuierlichen Kryopumpentechnologie, wie sie an den meisten Fusionsanlagen verwendet wird, hin zur kontinuierlichen Quecksilbertechnologie. Die damit erzielten Verbesserungen waren jedoch noch nicht ausreichend. Deshalb wurde damit begonnen, die gesamte Architektur umzubauen, unter Berücksichtigung der Funktionalität einer Brennstoffseparation am Torus und damit der Möglichkeit, einen Großteil des unverbrannten Brennstoffs schnell und direkt wiederzuverwenden. **Abbildung 17** zeigt die damalige Vorhersage, die Hoffnung machte, die Tritiuminventare von ITER (4 kg) auch für DEMO realisieren zu können.

Allerdings war damit noch keine Lösung gefunden, denn es gab keine Technologie

für die divertornahe Separation von ultra-reinem Wasserstoff zur Rezyklierung. Der nächste Schritt war daher, eine Technologie zu identifizieren, welche die neue Aufgabe lösen kann. Als solche erwies sich die Superpermeation von angeregtem Wasserstoff an Metallfolien. Die Idee einer Metallfolienpumpe war geboren. Inzwischen ist die Forschung auf einem guten Weg.

Die Validierung der Ziele mit realistischen Prozessdaten für die neue Architektur des Brennstoffkreislaufs erforderte nun allerdings die Entwicklung eines Softwarewerkzeugs, das alle Technologien im Brennstoffkreislauf beschreiben kann, eine Dimensionierung vornehmen kann und dann die Inventare berechnet. Auch dafür gab es in der Fusion keinen zufriedenstellenden Vorläufer. Im Forschungsthema Vakuum wurde daher ein Prozesssimulator entwickelt, auf der Basis einer kommerziellen, im Chemieanlagenbau weit verbreiteten Software, dem Aspen Custom Modeller. Anhand selbst erstellter Softwaremodule wurde der Brennstoffkreislauf komplett beschrieben. 2021 schließlich waren die einzelnen Systemblöcke im Brennstoffkreislauf soweit untersucht, dass das Tritiuminventar abgeschätzt werden konnte. Das Ergebnis am Beispiel des wassergekühlten Flüssigblei-Blankets (WCLL) ist in **Abbildung 18** dargestellt.

Wie sich zeigte, beträgt das Betriebstritiuminventar etwa 1,9 kg. Dazu addiert sich das Inventar in der ersten Wand des Plasmagefäßes von weiteren etwa 1 kg sowie eine Tritiumreserve, um eventuelle Störungen im Betrieb kurzfristig ausgleichen zu können, von noch einmal 1 kg. Insgesamt

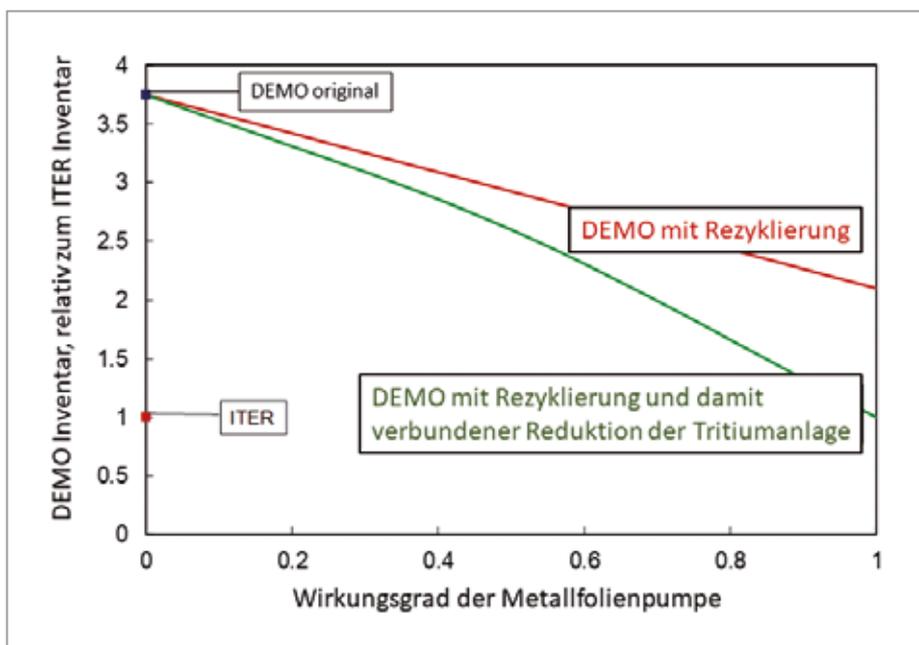


Abb. 17: Möglichkeiten zur Inventarreduktion durch Wechsel auf die neue Architektur des Brennstoffkreislaufs.

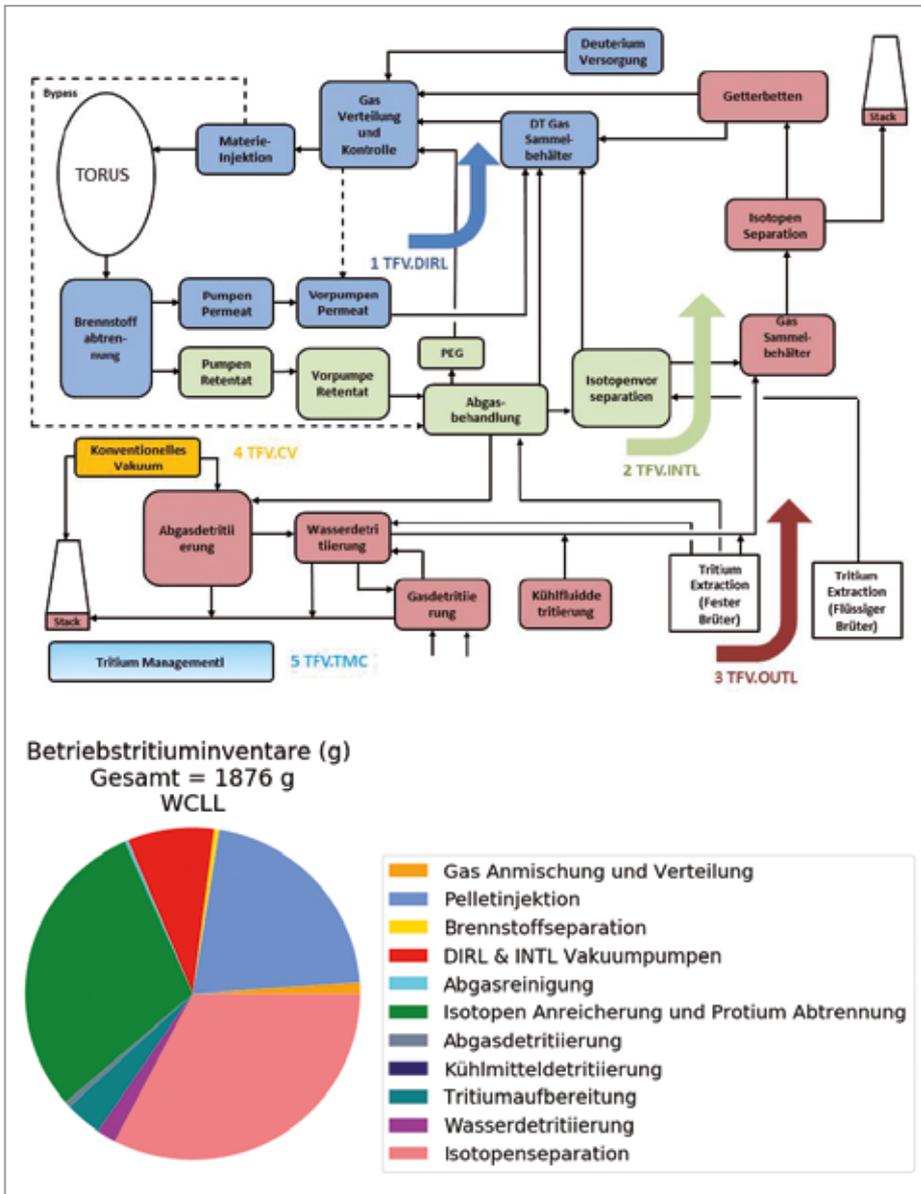


Abb. 18: Verteilung des operativen Tritiuminventars (unten) auf die einzelnen Systemblöcke (oben) im stationären Betrieb des Brennstoffkreislaufs (Rechnung für einen angenommenen Wirkungsgrad der Metallfolienpumpe von 0,8).

sind damit knapp unter 4 kg erreicht – genau der Wert, der für ITER bereits genehmigt wurde.

Nach Erreichen dieses wichtigen Meilensteins freut sich das gesamte Team nun da-

rauf, den technischen Reifegrad der neuen Technologien weiterzutreiben und schließlich die Funktionsweise des Brennstoffkreislaufs in DIPAK zu demonstrieren.

Preise und Auszeichnungen

Im Jahr 2021 erhielten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ITEP einige Auszeichnungen und Preise für Arbeiten und Projekte in verschiedenen Bereichen.



Abb. 1: Blick auf das Gebäude 668 (Foto: Behnisch Architekten)

Im September 2021 nahm das ITEP für das **Gebäude des Energy Lab 2.0, Bau 668 am KIT Campus Nord, den Hugo-Häring-Preis des Bunds Deutscher Architektinnen und Architekten (BDA)** entgegen.

Die Jury des Hugo-Häring-Preises würdigte unter anderem die ausgesprochen gelungene Anordnung der Bereiche und die visuelle Verbindung der Räume. Im Bau 668, den das ITEP gemeinsam mit dem

Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI) des KIT nutzt, sind das Power-Hardware-in-the-Loop Labor des ITEP sowie zugehörige Büroarbeitsplätze untergebracht.

Stefan Biser, ein am ITEP betreuter Doktorand, erhielt für seinen Beitrag „Design Space Exploration Study of a Distributed Turbo-electric Propulsion System for a Regional Passenger Aircraft“ auf dem **AIAA/**

IEEE Electrical Aircraft Technologies Symposium den **Best Paper Award**. Der Beitrag zeigt beispielhaft, wie sich ein neuartiges hybrid-elektrisches Antriebssystem eines Flugzeugs optimiert auslegen lässt.



Abb. 2: Professorin Tabea Arndt

Professorin Tabea Arndt wurde vom Präsidenten des KIT in das **Kuratorium der EnBW Stiftung** berufen. Mithilfe dieser unabhängigen Stiftung trägt die EnBW aktiv zum Gelingen der Energiewende und zum Klimaschutz bei und fördert entsprechende Initiativen und Projekte.

Dr. Giovanni de Carne startete seine **Helmholtz Nachwuchsgruppe** zum Thema „Hybrid Networks: A multi-modal design for the future energy system“. Er erhält eine fünfjährige Förderung für den Aufbau einer eigenen Forschergruppe auf diesem Gebiet.



Abb. 3: Dr. Giovanni de Carne

Wir freuen uns außerordentlich über die Anerkennung der exzellenten Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und danken Ihnen herzlich für ihre Ideen und ihr Engagement.

Dr. Carl Bühler

Neue RRP-Leiterkonzepte für verbessertes Pinning durch interne Oxidation

Seit der Entdeckung der Methode der inneren Oxidation als Mittel zur Erhöhung der kritischen Stromdichte von Leitern auf Nb₃Sn-Basis wurden Leistungsverbesserungen fast ausschließlich durch die beobachtete Kornfeinung erklärt. Die Wirkung nanoskaliger Ausscheidungen als künstliche Pinning-Zentren, welche die Leistung intern oxidiert Drähte erhöhen, wurde nur selten untersucht. Auch achtete die Forschung wenig darauf, wie die Anordnung der O- und Sn-Quellenstrukturen im Verhältnis zueinander die Phasenbildung und schließlich die interne Oxidation der Nb-Legierung beeinflusst. Die Information, dass Sauerstoff aus Filamentdesigns mit einer gemischten Zinn- und Sauerstoffquellenstruktur zuerst die intermediären Nb-Sn-Verbindungen oxidiert, wurde daher übergangen. Unterschiede in der Korngröße und im Pinning-Verhalten von Leitern unterschiedlicher Bauart wurden entweder durch das Fehlen eines Legierungselements oder durch eine zu dicke Cu-Schicht zwischen der Sauerstoffquellenstruktur und der zu oxidierenden Nb-Legierung erklärt. Die Forschung fand bisher keinen schlüssigen Mechanismus, mit dem sich erklären lässt, warum einige Leiterkonzepte eine Kornfeinung aufweisen und andere nicht.

Diese Arbeit zeigt erstmals, wie das Filamentdesign und damit die Trennung zwischen Sn- und O-Diffusion die Phasenbildung, die Nb₃Sn-Korngröße sowie die Bildung von nanoskaligen Ausscheidungen beeinflussen.

Bei Leiterkonzepten mit einer gemischten Sn- und O-Quellenstruktur wurde festgestellt, dass die Ausdiffusion von Sauerstoff verzögert wird, wenn intermediäre Nb-Sn-Verbindungen oxidiert werden. Dies wiederum verzögert die Oxidation des Legierungselements im Reaktionsrohr, sodass

oxidische Ausscheidungen erst dann entstehen, wenn sich bereits Nb₃Sn gebildet hat. Daher findet keine Kornfeinung statt, und die Löslichkeit des Legierungselements im gebildeten Nb₃Sn begrenzt die Bildung von Ausscheidungen. Auch ohne Kornfeinung wurde nachgewiesen, dass solche Ausscheidungen als leistungssteigernde Pinning-Zentren wirken und dass ein normaler PIT-Pulverkern bereits genügend Sauerstoff enthält, um das im Nb₃Sn verbleibende Legierungselement zu oxidieren. Da die Menge der Ausscheidungen durch die Löslichkeit des zu oxidierenden Legierungselements in Nb₃Sn begrenzt ist, bildet die Wahl der Nb-Legierung den einzigen Faktor, der die Pinning-Eigenschaften der supraleitenden Phase beeinflusst.

Bei binären Legierungen wie Nb1Zr wurden hohe Pinning-Beiträge von mehr als 50 Prozent gemessen. Bei ternären Legierungen wie Nb7,5Ta1Zr oder Nb7,5Ta2Hf wurde der Punkt-Pinning-Beitrag auf rund 30 Prozent gesenkt. In Nb7,5Ta1Zr-Proben wurde ein Nicht-Cu- J_c von 1222 A/mm² bei 16 T gemessen, was einem Anstieg von 13 Prozent gegenüber den 1122 A/mm² eines repräsentativen PIT-Drahtes entspricht.

In Leiterkonzepten mit getrennten, konzentrischen Sn- und O-Quellenstrukturen wird die Bildung von intermetallischen Nb-Sn-Verbindungen verzögert, sodass Sauerstoff direkt in die Nb-Legierung diffundieren kann. Dies führt dazu, dass sich in der Nb-Legierung eine größere Menge Sauerstoff in Form von Ausscheidungen auflöst. Anzeichen dafür sind die unterdrückte Rekristallisation der Nb-Legierung nach 300 h bei 640 °C sowie ein Absinken des Nb- T_c um 2,1 K nach der Wärmebehandlung. Übereinstimmend mit den ersten Berichten über eine erfolgreiche Kornfeinung wurde gezeigt, dass eine zeitliche Trennung der

Oxidation und der Nb-Sn-Phasenumwandlung erforderlich ist, um signifikant verfeinertes Nb₃Sn zu erhalten.

Berichte, dass die Rekristallisation des Nb-Legierungsvorläufers bei Enddurchmesser ohne den Einsatz einer Sauerstoffquelle unterdrückt werden kann, bestätigten sich nicht. Obwohl eine Unterdrückung der Rekristallisation in der Nb-Legierung nach 300 h bei 640 °C mit einer verfeinerten Korngröße korrelierte, wurde kein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Korngröße der Nb-Legierung und dem gebildeten Nb₃Sn festgestellt. Daraus lässt sich schließen, dass die Unterdrückung der Rekristallisation der Nb-Legierung nur auf das Vorhandensein von nanoskaligen Ausscheidungen in der Nb-Legierungsvorstufe aufgrund eines erfolgreichen Sauerstofftransports hinweist. Sie ist nicht die Ursache für die Kornfeinung des gebildeten Nb₃Sn.

Dr. Shahab Karrari

Integration eines Schwungmassenspeichersystems in Niederspannungs-Verteilnetze

Ein Schwungrad-Energiespeichersystem (Flywheel Energy Storage System, FESS) kann große Leistungsmengen schnell einspeisen oder aufnehmen, um das Netz nach einer abrupten Änderung der Erzeugung oder des Verbrauchs zu unterstützen. Neben der schnellen Reaktionszeit bietet ein FESS die Vorteile einer hohen Leistungsdichte und einer großen Zahl von Lade- und Entladezyklen ohne Kapazitätsverlust während seiner gesamten Lebensdauer. Diese Eigenschaften machen das FESS zu einem gut geeigneten Kandidaten für die Frequenzstabilisierung des Netzes oder auch die Glättung kurzfristiger Leistungsschwankungen auf lokaler Ebene.

Die Dissertation untersucht die Netzintegration eines Hochgeschwindigkeits-FESS auf der Niederspannungsebene aus mehreren Perspektiven. Zunächst werden die Probleme der Platzierung und Dimensionierung eines FESS in Niederspannungsverteilnetzen für Leistungsglättungsanwendungen behandelt. Um den am besten geeigneten Standort für ein FESS zu finden, wird eine datengetriebene Methode zur Abschätzung der relativen Spannungsempfindlichkeit vorgeschlagen, die auf dem Konzept der Transinformation basiert. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, dass sie kein Netzmodell erfordert und nur Messwerte an den interessierenden Punkten verwendet. Messergebnisse aus einem realen Netz in Süddeutschland zeigen, dass mit dem vorgeschlagenen Ansatz die Netzanschlusspunkte mit einer höheren Spannungsempfindlichkeit gegenüber Wirkleistungsänderungen, die am meisten von einem durch FESS ermöglichten glatteren Leistungsprofil profitieren können, erfolgreich zugeordnet werden können.

Darüber hinaus wird eine neue Methode zur Dimensionierung von Energiespeicher-

systemen unter Verwendung von Messdaten eingeführt. Der vorgeschlagene Ansatz erkennt wiederkehrende Verbrauchsmuster in aufgezeichneten Leistungsprofilen mithilfe des Motif Discovery-Algorithmus, um sie dann zur Dimensionierung verschiedener Speichertechnologien, einschließlich eines FESS, zu verwenden. Anhand von gesammelten Messdaten aus mehreren Niederspannungsnetzen in Deutschland zeigt die Dissertation, dass die Speichersysteme mit den aus den detektierten Mustern abgeleiteten Charakteristika während der gesamten Messperiode effektiv für ihre Anwendungen genutzt werden können.

Weiterhin wird ein dynamisches Modell eines Hochgeschwindigkeits-FESS entwickelt und mit experimentellen Ergebnissen in mehreren Szenarien validiert, wobei die Verluste und der Hilfsenergiebedarf des Systems berücksichtigt werden. In den untersuchten Szenarien wurde eine maximale Differenz von nur 0,8 Prozent zwischen dem Ladezustand des Modells und dem realen FESS beobachtet, was die Genauigkeit des entwickelten Modells belegt.

Nach Festlegung des erforderlichen Aufbaus wurde die Leistungsfähigkeit eines 60 kW-Hochgeschwindigkeits-FESS während mehrerer Frequenzabweichungsszenarien anhand von Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) Tests beurteilt. Die Ergebnisse der PHIL-Tests zeigen, dass das Hochgeschwindigkeits-FESS nach einer plötzlichen Frequenzabweichung sehr schnell reagiert und in knapp 60 ms die erforderliche Leistung erreicht, wobei die neuesten Anforderungen der Anwendungsregeln für die Frequenzunterstützung auf der Niederspannungsebene erfüllt werden.

Um schließlich die Vorteile des schnellen Verhaltens des FESS für Energiesysteme mit

geringer Trägheit zu demonstrieren, wurde ein neuartiger adaptiver Trägheits-Emulationsregler für das Hochgeschwindigkeits-FESS eingeführt; seine Leistung wurde in einem Microgrid mit geringer Trägheit durch Simulationen und Experimente validiert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Verwendung des FESS mit dem vorgeschlagenen Trägheits-Emulationsregler die maximale Änderungsrate der Frequenz um 28 Prozent und die maximale Frequenzabweichung um 44 Prozent während der Inselbildung des untersuchten Microgrid reduzieren kann und mehrere zuvor vorgestellte adaptive Regelungskonzepte übertrifft. Der vorgeschlagene Regler wurde auch auf einem realen 60 kW-FESS mit dem Konzept des Rapid Control Prototyping implementiert, und die Leistungsfähigkeit des FESS mit dem neuen Regelungsentwurf wurde anhand von PHIL-Tests des FESS validiert. Die PHIL-Ergebnisse, welche die allererste experimentelle Validierung der Trägheitseмуляtion mit einem FESS darstellen, bestätigen die Simulationsergebnisse und zeigen die Vorteile des vorgeschlagenen Reglers.



Abb. 1: 60 kW-Schwungmassenspeichersystem in der Power-Hardware-in-the-Loop Testumgebung.

Lehre und Bildung

Vorlesungen, Seminare und Workshops

Vorlesungen

KIT-Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

- **Supraleitende Systeme der Energietechnik** (Holzapfel, Noe) WS 20/21
- **Supraleitende Materialien** (Holzapfel, Hänisch) WS 20/21
- **Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli, De Carne) WS 20/21
- **Übungen zu Energy Storage and Network Integration** (Noe, Grilli, De Carne, Kottonau, Karrari) WS 20/21
- **Projekt Management für Ingenieure** (Noe, Day) SS 20
- **Grundlagen und Technologie supra-leitender Magnete** (Arndt) SS 20
- **Superconductors Materials for Energy Applications** (Grilli) SS 20
- **Anleitung zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten** (Holzapfel) SS 20
- **Electrical and Electronics Engineering for Mechanical Engineers** (De Carne) SS 20

KIT -Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

- **Vakuumtechnik** (Day) WS 20/21
- **Übung zu Vakuumtechnik** (Day, Varoutis) WS 20/21
- **Kältetechnik A** (Grohmann) WS 20/21
- **Übungen zu Kältetechnik A** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 20/21
- **Cryogenic Engineering** (Grohmann) WS 20/21
- **Cryogenic Engineering-Exercises** (Grohmann, Mitarbeiter) WS 20/21

- **Physical Foundations of Cryogenics** (Grohmann) SS 20
- **Physical Foundations of Cryogenics-Exercises** (Grohmann) SS 20
- **Kältetechnik B** (Grohmann) SS 20
- **Übungen zu Kältetechnik B** (Grohmann, Mitarbeiter) SS 20

KIT -Fakultät Maschinenbau

- **Fusionstechnologie A** (Day, Demange, Fietz, Weiss, Wolf) WS 20/21
- **Fusionstechnologiekolloquium*** (Noe) SS 20
- **Magnet-Technologie für Fusionsreaktoren** (Fietz, Weiss, Wolf) SS 20
- **Vakuumtechnik und Tritiumbrennstoffkreislauf** (Day, Frances, Gröble) SS 20

House of Competence

- **„Netzwerken – Verbindungen schaffen Freiheiten“** (Arndt) WS 20/21

Seminare

Kryo-Seminare

- **22.–24.9.2021**
VDI-Wissensforum „Kryotechnik“
(Kläser)

Duale Hochschule BW – Fachbereich Maschinenbau

- **Arbeitssicherheit und Umweltschutz** (Bauer) SS 20
- **Thermodynamik 1 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 20
- **Thermodynamik 2 für Maschinenbauer** (Neumann) SS 20
- **Tiefemperaturtechnik** (Neumann) WS 20

Zhejiang-Universität (China)

- **14.07.–25.08.**
CryogenicsOnline-Vorlesung
(10 Termine à 2 Zeitstunden)
(Neumann) SS 20

Harbin Institute of Technology (China) – Summer School*

- **16.07.2021 (High) Magnetic fields by superconductors** (Arndt)

Betreute Doktorarbeiten

(* akademischer Betreuer; ** abgeschlossen)

ENERGIE

Gabriele Arena

Development and testing of a multi-modal hardware in the loop setup

Betreuer: Dr.-Ing. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Fargah Ashrafidehkordi

Impedance-based stability and accuracy analysis of a Power-Hardware-In-Loop evaluation

Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Stefan Biser

Entwicklung eines Tools zur analytischen Auslegung und Optimierung hybrid-elektrischer Luftfahrtantriebe

Betreuer: Prof. Dr. V. Hagenmeyer (IAI), Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Alexander Buchholz

Prospective Life Cycle Assessment of High-Temperature Superconductors for Future Grid Applications

Betreuer: Dr. M. Weil (ITAS), Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Maëva Courcelle

Development of an on-line load sensitivity identification microcontroller toolbox

Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Shahab Karrari **

Integration of Flywheel Energy Storage Systems in Low Voltage Distribution Grids
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Ali Khonya

Superconducting electrical propulsion system modelling

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Dustin Kottonau

Echtzeitsimulation und Netzintegration von Mikrogasturbinen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Masooome Maroufi

Real time modelling of hybrid networks
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Philipp Müller

Theoretische und experimentelle Untersuchung des Wechselstromverhaltens supraleitender Wicklungen für die Anwendung in rotierenden Maschinen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Quoc Hung Pham

Untersuchung von schnellen Schaltvorgängen in Hochtemperatur-Supraleitern
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Karthik Rajashekaraiah

Echtzeit Modellierung von hybriden Netze
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Carsten Räch

Entwicklung von hocheffizienten modularen Hochstromsystemen auf Basis von Hochtemperatursupraleitern zur Übertragung großer Leistungen von Windparks auf Mittelspannungsniveau

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Fabian Schreiner

Aufbau eines supraleitenden DC Windkraftgenerators und Untersuchung der Netzanbindung
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Qiucen Tao

Smart demand controllers for multi-modal networks
Betreuer: Dr. G. de Carne, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

Carlos Roberto Vargas-Llanos

Numerical modeling and characterization of high-temperature superconductor coils for electrical machines
Betreuer: PD Dr. F. Grilli, Prof. Dr.-Ing. M. Noe (KIT, ETIT)*

MAGNET

Daniel Nickel

Untersuchungen zum Quench-Verhalten und zur Degradation von HTS Hochstrom-Leitern für zukünftige Fusionsmagnete
Betreuer: Dr. M. Wolf, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)*

Kirtana Phutran

Cable and winding concepts for 20 T HTS dipole accelerator magnets
Betreuer: Prof. Dr. T. Arndt (KIT, ETIT)*

MATERIAL

Kai Ackermann

Flusslinedynamik in REBCO-Schichten im Bereich des *Glass-Liquid*-Phasenübergangs
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holz-
apfel (KIT, ETIT)

Carl Bühler **

Neue RRP Leiterkonzepte für verbessertes
Pinning durch interne Oxidation
Betreuer: Dr. S. Kauffmann-Weiss, Prof. M.
Heilmaier (MACH)*

Wolfram Freitag

Optimierung eines kontinuierlichen Prozes-
ses zur Herstellung REBa₂Cu₃O_{7-x}-basierter
supraleitender Bandleiter aus chemischen
Präkursorenlösungen
Betreuer: Prof. Dr. B.
Holzapfel, Prof. Dr.-Ing. J. Sauer (IKFT)*

Lukas Grünewald

Elektronenmikroskopische Untersuchung
von eisen- und kupferbasierten Hochtem-
peratursupraleitern
Betreuer: Prof. Dr. B. Holzapfel, Prof. Dr. D.
Gerthsen (LEM)*

Ruslan Popov

Stromtragfähigkeit und Pinningeigenschaf-
ten REBCO-basierter Dünnschichten und
Bandleiter bei tiefen Temperaturen und in
hohen Magnetfeldern
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holz-
apfel (KIT, ETIT)*

Stylianos Tokatlidis

Influence of transition metal doping on the
electrical transport properties of Fe (Se, Te)
thin films
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holz-
apfel (KIT, ETIT)*

VAKUUM

Cristian Gleason-González

Modelling of rarefied neutral gas flow
Betreuer: Dr. S. Varoutis, Prof. Dr. R. Stieg-
litz (KIT, MACH)*

Yannick Hörstensmeyer

Ein Prozess-Simulator zur Auslegung, Mo-
dellierung und Optimierung des inneren
Brennstoffkreislaufs eines Fusionskraft-
werks
Betreuer: Dr.-Ing. C. Day, Prof. Dr.-Ing. R.
Stieglitz (INR)*

Yannick Kathage

Entwicklung einer Metallfolienpumpe auf
dem Prinzip der Superpermeation
Betreuer:
Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT,
Mach)*

Cyra Neugebauer

Validation of a process for semi-continuous
separation of hydrogen isotopes
Betreuer:
Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT,
Mach)*

Jonas Schwenzer

Ein Prozess-Simulator zur Vorhersage und
Optimierung des Betriebs des Brennstoff-
kreislaufs eines Fusionskraftwerks
Betreuer:
Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT,
Mach)*

Tim Teichmann

Entwicklung eines Berechnungsverfahrens
für quecksilbergetriebene Vakuumpumpen
in einem weiten Bereich der Knudsenzahl-
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz
(KIT, Mach)*

Annika Uihlein

Entwicklung eines Temperaturwechselab-
sorptionsverfahrens zur Trennung von
Wasserstoffisotopen im Fusionsbrennstoff-
kreislauf
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R.
Stieglitz (KIT, Mach)*

Alejandro Vazquez-Cortes

Hydrogen Interaction with Superpermeable
Metal Foil Surfaces
Betreuer: Dr. C. Day,
Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, Mach)*

Betreute Masterarbeiten

(* akademischer Betreuer; ** abgeschlossen)

Maëva Courcelle **

Construction of a data communication connection between a real-time simulator and an external energy system plant on a Modbus protocol basis
Betreuer: D. Kottonau, Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Mateusz Krawczyk **

Comparison of two numerical formulations for modelling the electromagnetic behaviour of high-temperature superconducting tapes for power cables
Betreuer: PD Dr. F. Grilli*

Philipp Müller **

Konzeptionelle Auslegung supraleitender Bahntransformatoren
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Marco Öhl **

Lehrmodelle des Elektromotors. Entwicklung, Konstruktion und Fertigung mit dem 3D-Drucker
Betreuer: A. Rimikis / Prof. Dr. Dipl.-Psych. I. Langemeyer (KIT)*

Kevin Raczka **

Concept design of the divertor pumping system for the Divertor Tokamak test Facility
Betreuer: Dr. C. Day, Prof. Dr. R. Stieglitz (KIT, MACH)*

Stefanelli Lorenzo

Identification of a Real Micro Gas Turbine based on Rowen's model
Betreuer: D. Kottonau, Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Felix Wald

Controller-Hardware-in-the-Loop and Power-Hardware-in-the-Loop Testing of a Virtual Synchronous Machine for Asynchronously Connected Grids
Betreuer: Dr. G. de Carne / Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Johannes Weis

Determination of the thermal resistance between metallic surfaces of copper and stainless steel for high current HTS Cable-in-Conduit Conductor
Betreuer: Dr. N. Bagrets, Prof. Dr. B. Holzapfel

Alexander Zilz

Untersuchung der verdünnten Gasströmung im Pumprohr eines 3He/4He Mischungskryostaten
Betreuer: Dr. Tantos / Prof. Dr.-Ing. S. Grohmann (ITTK)*

Betreute Bachelorarbeiten

(* akademischer Betreuer; ** abgeschlossen)

Andreas Alexeenko **

Untersuchung von geometrischen Einflüssen auf das Magnetisierungsverhalten von supraleitenden Bandstapeln

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Dominic Barthlott **

Numerische Modellierung von supraleitenden Magneten aus YBCO Bandleitern

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Julian Bell

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Experimentierstation

Betreuer: A. Rimikis / Prof. Dr. B. Holzapfel*

Katrin Bitzer **

Modellierung des resistiven Phasenübergangs von supraleitenden Dünnschichten

Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Leo Burger **

Untersuchung zur Optimierung der Prozessparameter bei der Herstellung supraleitender ErBCO-Dünnschichten auf IBAD-Substraten mittels Definitve Screening-Versuchsplänen

Betreuer: W. Freitag, Dr. J. Hänisch*

Nicolas Dworschak

Entwicklung eines didaktischen Konzeptes für die Experimentierstation „Brennstoffzelle“ im KIT-Schülerlabor Energie

Betreuer: A. Rimikis / Prof. Dr. B. Holzapfel*

Daniel Freerichs **

Herstellung und Untersuchung von Dünnschichten des Perowskites $\text{Nd}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{NiO}_3$

Betreuer: K. Ackermann, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Manuel Heinzelmann **

3D-Druck von tieftemperaturbeständigen Bauteilen mit dem Hochleistungspolymer PEEK

Betreuer: Dipl.-Ing. S. Bobien, Dipl.-Ing. T. Schneider* (DHBW)

Simon Martz **

Experimentelle Untersuchung des Schaltverhaltens von Hochtemperatur-Supraleitern bei wechselndem Magnetfeld

Betreuer: Q. Pham, Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Jonas Mensinger **

Optimierung der Prozessparameter zur Herstellung supraleitender REBCO-Dünnschichten auf IBAD-Substraten mittels statistischer Versuchsplanung

Betreuer: W. Freitag, Dr. J. Hänisch*

Patrick Schäfer **

Fertigung und Untersuchung gestapelter Supraleiterentwicklungen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Noe*

Philipp Rembe **

Optimierung der Prozessparameter zur Herstellung supraleitender ErBCO-Dünnschichten auf IBAD-Substraten mittels statistischer Versuchsplanung

Betreuer: Prof. Dr. E. Gottwald, Prof. Dr. Sauer (IKFT)*

Michael Temmen **

Deposition und Charakterisierung von Strontium-Neodym-Nickelat-Schichten

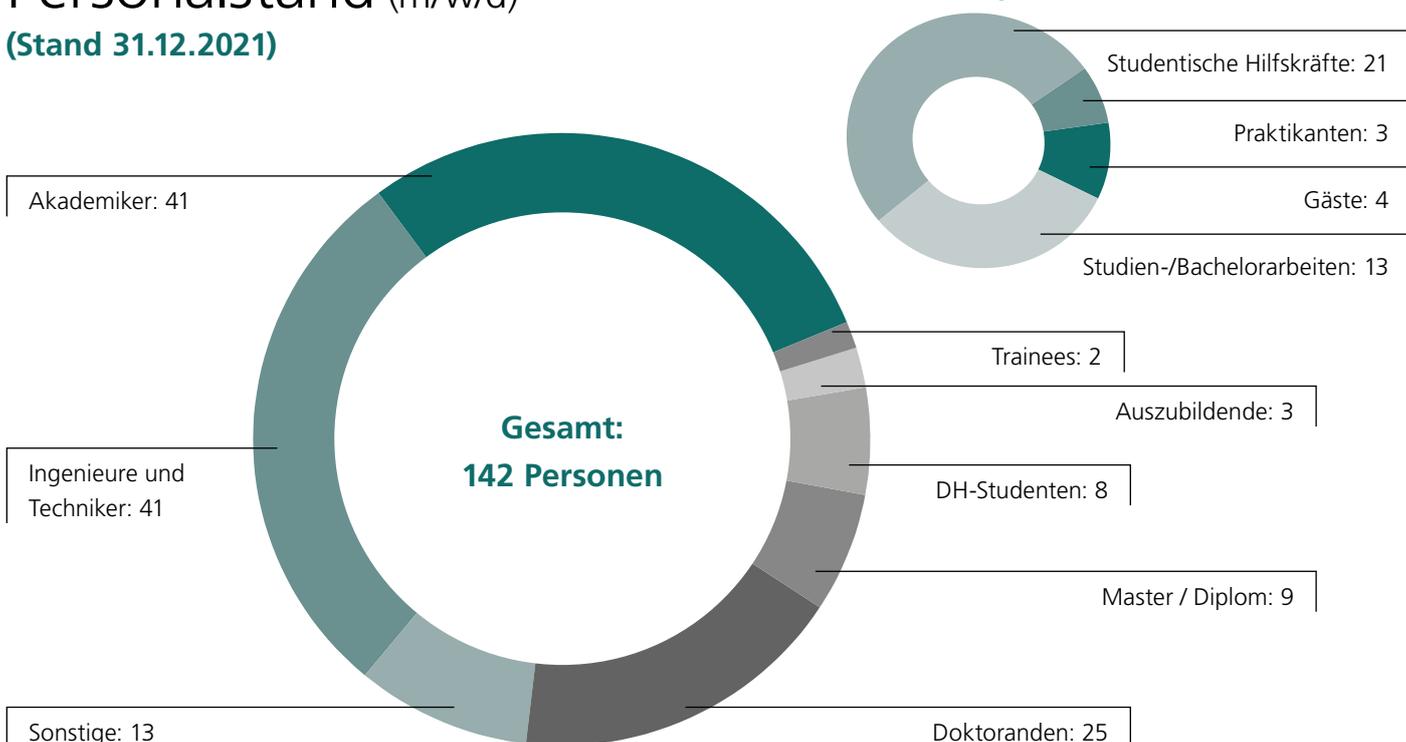
Betreuer: Dr. J. Hänisch, Prof. Dr. B. Holzapfel*

Zahlen und Daten

Organigramm

Supraleiter- und Kryo-Materialien (Holzapfel)	Supraleitende Energietechnische Anwendungen (Noe)	Supraleitende Magnettechnologie (Arndt)	Technologien des Fusionsbrennstoff-kreislaufs (Day)
Supraleitende Materialien (Hänisch)	Netz- und Energiekomponenten (Noe)	Spulen- und Magnettechnologie (Hornung)	Vakuumtechnologie und Prozessintegration (Day)
Leiter- und Kabelkonzepte/-technologien (Holzapfel)	Modellierung von Supraleitern und Komponenten (Grilli)	Hochstromkomponenten für Wasserstoff-technologien und Fusion (Wolf)	Strömung verdünnter Gase (Varoutis)
Struktur- und Funktionsmaterialien für Kryoanwendungen (Weiss)	Echtzeit Systemintegration (De Carne)	Rotierende Maschinen (Arndt)	Vakuumhydraulik und Wasserstoffseparation (Giegerich)

Personalstand (m/w/d) (Stand 31.12.2021)



Personalveränderungen

Neu eingestellt*

Gabriele Arena
Fargah Ashrafidehkordi
Maëva Courcelle
Asef Ghabeli
Ali Khonya
Paul Kruse
Masooma Maroufi
Philipp Müller
Karthik Rajashekaraiyah
Dietrich Riegel
Camelia Schulz
Valerij Selskij
Othmann Taalibi
Qiucen Tao
Stylios Tokatlidis
Annika Uihlein
Paul Walter

Ausgeschieden*

Hans Chen
Horst Haas
Reinhard Heller
Manuel Heinzlmann
Andrea Kling †
Philip Kreideweis
Yingzhen Liu
Jürgen Rössler
Michael Stamm

* (ohne Praktikanten, Gäste und studentische Hilfskräfte)

Studentische Hilfskräfte

Dominic Barthlott

Philipp Müller

Anantha Padmanabhan

Johanna Bobien

David Kubeneck

Yassin Rahman

Maëva Courcelle

Ziyang Li

Nikolas Rimikis

Leonhard Döring

Patrik Lison

Michael Temmen

Farouk Haidar

Simon Martz

Emanuel Weiss

Fabian Henßler

Samuel Nick

Lukas Wirth

Vadim Mai

Lars Ohnemus

Jan Zudock

Gastwissenschaftler

F. Huber

15.08.21–31.10.21

University of Strathclyde,
Glasgow, Schottland

J. Zhang

26.10.21–31.10.22

Southwest Jiaotong University,
Sichuan, P.R. China

P. Zhou

23.08.21–22.08.23

Southwest Jiaotong University,
Chengdu, P.R. China

J. Shi

23.10.21–31.10.22

Southwest Jiaotong University,
Sichuan, P.R. China

Zahlen und Daten

Mitgliedschaften

in technisch und wissenschaftlich relevanten Gremien

Tabea Arndt

- Programmkomitee Jahrestagung FVEE, „Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung“, 10.-11.11.2021, Berlin
- Programmkomitee der Tagung ZIEHL, 04.-05.04.2022, Berlin
- International Organizing Committee Conference Magnet Technology, MT27, Fukuoka, Japan (virtuell), 15.-19.11.2021
- Mitglied DKE TC90
- Delegierte zum Technology Cooperation Program High-Temperature Superconductivity der International Energy Agency
- Mitglied des Magnet Panel der Muon-Collider-Aktivität, CERN
- Mitglied des Kuratoriums der EnBW-Stiftung
- „Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung“ des BMWi, Kuratorin seit Ende 2021

Nadja Bagrets

- Expertin innerhalb des Arbeitsfeldes TWA16 der VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards bei ISO) zur Durchführung von Ringversuchen
- Expertin im Komitee K 184 „Supraleiter“ der deutschen Kommission Elektrotechnik (DKE) im DIN
- Expertin im technischen Komitee TC90 „Supraleiter“, Arbeitsgruppe WG5 der internationalen elektrotechnischen Kommission (IEC)

Kai Bauer

- Mitglied im Helmholtz-Arbeitskreis HSE „Health, Safety and Environment“
- Mitglied der Prüfungsausschüsse der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Standort Karlsruhe in den Fachbereichen „Maschinenbau“ und „Wirtschaftsingenieurwesen“

Christian Day

- Mitglied des Vorstandsrates der Dt. Vakuumgesellschaft (DVG).
- Projektleitung des Bereichs Tritium-Materiezufuhr-Vakuum (TFV) im Europäischen Fusionsprogramm EUROFUSION
- Mitglied im Fusion For Energy – Technical Advisory Panel
- Sprecher Topic ‘Vakuum und Tritium’ der deutschen DEMO-Initiative
- Mitglied im International Advisory Committee der RGD (Rarefied Gas Dynamics Conference)
- Mitglied des Programmkomitees der ISFNT (international Symposium of Fusion Nuclear Technology).
- Chartered Engineer der American Vacuum Society (AVS).
- Mitglied im Steering Committee JT-60SA
- Mitglied im Board der IAEA Technical Meeting Reihe Brennstoffkreislauf

Giovanni de Carne

- Helmholtz Nachwuchsgruppe Leiter – 2020
- Chairman der IEEE PES Task Force “Solid State Transformer integration in distribution grids”
- Sekretär und Mitglieder der CIGRE Arbeitsgruppe B4.91 “Power electronics-based transformer technology, design, grid integration and services provision to the distribution grid”
- Mitglieder der CIGRE Arbeitsgruppe A3.40 “Technical requirements and field experiences with MV DC switching equipment”
- Mitglieder der IEEE Arbeitsgruppe P2004 “Hardware in the Loop”.
- Mitglieder der IEEE Arbeitsgruppe “Modelling and Simulation with High Penetration of Inverter-Based Renewables”
- Assoziierte Editor der IEEE Zeitschrift „IEEE Open Journal for Power Electronics“
- Assoziierte Editor der IEEE Zeitschrift “IEEE Industrial Electronic Magazine”
- Assoziierte Editor der Springer Zeitschrift “Electrical Engineering – Archiv für Elektrotechnik”
- Mitglied beim „Institute of Electrical and Electronics Engineers“
- Mitglied beim Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

Walter H. Fietz

- Mitglied des „International Organizing Committee of Symposium of Fusion Technology (SOFT) conference“
- Program Committee Member of HTS4Fusion Conductor Workshop
- IEEE Senior Member
- Mitglied des „IEEE Council of Superconductivity“

Thomas Giegerich

- Vorsitzender des Fachverbandes Vakuumphysik und –technik der Dt. Physikalischen Gesellschaft (DPG).

Jens Hänisch

- Superconductor Science and Technology, Mitglied im Editorial-Board
- European Magnetic Field Laboratory EMFL, Mitglied im User Proposal Selection Committee
- Applied Superconductivity Conference, Mitglied im Programmkomitee Materialien
- Mitglied im KIT-Konvent

Reinhard Heller

- Computation of Thermo-Hydraulic Transients in Superconductors (CHATS-AS), Board member
- DKE/DIN K 184 – Supraleiter
- International Electrotechnical Commission (IEC TC90) – Superconductivity – Member WG 12 – „Superconducting Power Devices - General Requirements for Characteristic Tests of Current Leads designed for Powering Superconducting Devices“

Bernhard Holzapfel

- Applied Superconductivity Conference, Member of International Program Committee
- European Conference on Applied Superconductivity, Member of International Program Committee
- International Symposium on Superconductivity (ISS), Member of International Program Committee

Holger Neumann

- Member of the ICE Committee
- Board member of the Cryogenic Engineering Conference CEC seit 2019 (gewählt auf der Tagung in Hartford)
- Vorsitzender des DKV
- Gastprofessur in China an der Zhejiang University in Hangzhou (China)

Mathias Noe

- Kurator des Forschungsnetzwerkes Hochtemperatur-Supraleitung des BMWi
- Internationaler Experte der CIGRE D1.69 Arbeitsgruppe „Assessing emerging test guidelines for HTS applications in power systems“
- Internationaler Experte der CIGRE Arbeitsgruppe D1.64 “Cryogenic dielectric insulation“
- Deutscher Abgesandter der International Energy Agency, Technology Cooperation Programm Hochtemperatur-Supraleitung
- Mitglied des Boards der Applied Superconductivity Conference
- Mitglied des Interessenverbandes Supraleitung (ivsupra)
- Mitglied der Arbeitsgruppe zur Erstellung einer Beschleuniger F&E Roadmap im Rahmen einer europäischen Strategie für Teilchenphysik

Sonja Schlachter

- Mitglied des „International Cryogenic Material Conference (ICMC) Board of Directors“

Stylios Varoutis

- Mitglied im wissenschaftlichen Komitee der NEGF (European Conference on Non-equilibrium Gas Flows).
- Mitglied im Auswahlkomitee des EU High Performance Computers MARCONI
- Mitglied im Europa/Japan-Auswahlkomitee für Großrechnersimulationen im „Broader Approach“
- Mitglied der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG)

Klaus-Peter Weiss

- DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE Referat K 184 „Supraleiter“, Obmann
- IEC International Electrotechnical Commission/Technical Committee 90 „Superconductivity“, Mitglied WG 2 „Critical current measurement of Nb-Ti composite superconductors“, WG 5 „Tensile test and electro-mechanical properties of composite superconductors“, WG 7 „Critical current measurement method of Nb3Sn composite superconductors“, WG 11 „Critical temperature measurement – Critical temperature of composite superconductors“, WG 13 „General characteristics for practical superconducting wires“
- Sprecher der Arbeitsgruppe „Magnet Design“ innerhalb der deutschen Koordination der Fusionsforschung für DEMO
- Member of the International Technical Program Committee - MEM18 9th Workshop on Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors / Organisator MEM20 10th Workshop in Karlsruhe
- Board Member ICMC (International Cryogenic Materials Conference) Subcommittee International Cryogenic Material Library
- Experte im EUROfusion Scientific & Technical Advisory Committee (STAC)

Veröffentlichungen

Fusion

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenaufsatz

* Heller, R., Fietz, W. H., Hamada, K., et. al. Overview and first operation of the high temperature superconductor current leads during integrated commissioning of JT-60SA

Fusion Engineering and Design
10.1016/j.fusengdes.2021.112910

* Nickel, Daniel S., Fietz, Walter H., Weiss, Klaus-Peter, et. al.

Impact of bending on critical current of HTS CrossConductors
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2021.3076491

* Wolf, Michael J., Ebner, Christof, Fietz, Walter H., et. al.

High temperature superconductors for fusion applications and new developments for the HTS CroCo conductor design Fusion engineering and design
10.1016/j.fusengdes.2021.112739

* M. Abdou, M. Riva, A. Ying, et. al. Cho, Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency, Nuclear Fusion 61 (2021) 013001. doi:10.1088/1741-4326/abbf35

* C. Tantos, S. Varoutis, C. Day, et. al. DSMC simulations of neutral gas flow in the DTT particle exhaust system, Nuclear Fusion 62 (2022) 026038. doi:10.1088/1741-4326/ac42f5

* C. Tantos, S. Varoutis, Chr. Day, Heat transfer in binary polyatomic gas mixtures over the whole range of the gas rarefaction based on kinetic deterministic modeling, Physics of Fluids 33 (2021) 022004. doi:10.1063/5.0033938

* T. Teichmann, Chr. Day, Particle Simulation of Linear Diffusion Pumps for DEMO Torus Exhaust Pumping, Fusion Engineering and Design 169 (2021) 112694. doi:10.1016/j.fusengdes.2021.112694

* A. Frattolillo, L.R. Baylor, Chr. Day, et. al. Injection of high-speed solid D2 pellets using a “Direct-Line-of-Sight” (DLS) guide tube, Fusion Engineering and Design 162 (2021) 112138. doi:10.1016/j.fusengdes.2020.112138

* K. Battes, Chr. Day, V. Hauer, Systematic study of the outgassing behavior of different ceramic materials, J. Vac. Sci. Technol. B 39 (2021) 034202. doi: 10.1116/6.0000954

* L. Spallino, M. Angelucci, A. Pasqualetti, et. al. Cryogenic vacuum considerations for future gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 104 (2021) 062001. doi: 10.1103/PhysRevD.104.062001

* X. Luo, Chr. Day, Topological impact of a simple selfreplication geometric structure with great application potential in vacuum pumping and photovoltaic industry, J. Vac. Sci. Technol. B 39 (2021) 054203. doi: 10.1116/6.0001222

* B. Ploeckl, P. T. Lang, A. Frattolillo, et. al. Matter Injection in EU-DEMO: The Preconceptual Design, Fusion Science and Technology 77 (2021) 266-278. doi: 10.1080/15361055.2021.1903784

* F. Maviglia, M. Siccinio, C. Bachmann, et. al. Impact of plasma-wall interaction and exhaust on the EU-DEMO design, Nuclear Materials and Energy 26 (2021) 100897. doi:10.1016/j.nme.2020.100897

* F. Militello, L. Aho-Mantila, R. Ambrosino, et. al. Preliminary analysis of alternative divertors for DEMO, Nuclear Materials and Energy 26 (2021) 100908. doi:10.1016/j.nme.2021.100908

* M. Siccinio, P. Chiovaro, F. Cismondi,
et. al.
Feasibility of D-D start-up under realistic
technological assumptions for EU-DEMO,
Fusion Engineering and Design 171 (2021)
112554.
doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112554

Proceedingsbeitrag

I. Podadera, H. Dzitko, F. Arbeiter, et. al.
The Accelerator Systems of IFMIF-DONES
Multi-MW Facility, Proc. 12th International
Particle Accelerator Conference (IPAC'21),
virtual, 24-28 May 2021.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB211

Buchbeitrag

L.V. Boccaccini, Chr. Day,
Magnetic confinement fusion – Reactor
blanket technologies, in: Encyclopedia of
Nuclear Energy, Elsevier, 2021.
doi:10.1016/B978-0-12-819725-7.00205-1

Chr. Day,
Vacuum Pumping and Fuelling, in: Funda-
mentals of Magnetic Fusion Technology,
IAEA, 2021
ISBN 978-92-0-130410-0

Veröffentlichungen

Materials and Technologies for the Energy Transition (MTET)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

Zeitschriftenaufsatz

- * Liu, Yingzhen, Ou, Jing, Cheng, Yi, et. al.
Investigation of AC loss of superconducting field coils in a double-stator superconducting flux modulation generator by using T-A formulation based finite element method
Superconductor Science and Technology
10.1088/1361-6668/abef7e
- * Liu, Yingzhen, Ou, Jing, Gyuraki, Roland, et. al.
Study of contact resistivity of a no-insulation superconducting coil
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abd14d
- * Buchholz, Alexander, Noe, Mathias, Kottonau, Dustin, et. al.
Environmental Life Cycle Assessment of a 10 kV High-Temperature Superconductor Cable System for Energy Distribution
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3070703
- * Ainslie, Mark, Grilli, Francesco, Quéval, Loïc, et. al.
Corrigendum: A new benchmark problem for electromagnetic modelling of superconductors: the high-T superconducting dynamo (2020 Supercond. Sci. Technol. 33 105009)
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abd522
- * Arndt, Tabea, Holzapfel, Bernhard, Noe, Mathias, et. al.
New coil configurations with 2G-HTS and benefits for applications
Superconductor Science and Technology
10.1088/1361-6668/ac19f4
- * Arsenault, Alexandre, Sirois, Frederic, Grilli, Francesco
Efficient modeling of high temperature superconductors surrounded by magnetic components using a reduced H-phi formulation
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3073274
- * Arsenault, Alexandre, Sirois, Frederic, Grilli, Francesco
Implementation of the H- ϕ Formulation in COMSOL Multiphysics for Simulating the Magnetization of Bulk Superconductors and Comparison With the H-Formulation
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2020.3033998
- * Berrospe-Juarez, Edgar, Trillaud, Frederic, Zermeño, Víctor M.R., Grilli, Francesco
Advanced electromagnetic modeling of large-scale high-temperature superconductor systems based on H and T-A formulations
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abde87
- * Cayado, P., Hauck, D., Barthlott, D., et. al.
Determination of the Oxygen Chain Ordering in REBa₂Cu₃O_{7- δ} by Electrical Conductivity Relaxation Measurements
ACS Applied Electronic Materials
10.1021/acsaelm.1c00861
- * Cheng, Yi, Zhang, Yuanzhi, Qu, Ronghai, et. al.
Design and Analysis of 10 MW HTS Double-Stator Flux-Modulation Generator for Wind Turbine
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2021.3061928
- * De Sousa, Wescley Tiago Batista, Kottonau, Dustin, Karrari, Shahab, et. al.
Deployment of a Resistive Superconducting Fault Current Limiter for Improvement of Voltage Quality and Transient Recovery Voltage
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2020.3016460
- * Díez-Sierra, Javier, Rijckaert, Hannes, Rikel, Mark, et. al.
All-chemical YBa₂Cu₃O_{7- δ} coated conductors with preformed BaHfO₃ and BaZrO₃ nanocrystals on Ni5W technical substrate at the industrial scale
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/ac2495

- * Grilli, Francesco
Calculating the full-range dynamic loss of HTS wires in an instant
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abc7f6
- * Grünewald, Lukas, Nerz, Daniel, Langer, Marco, et. al.
Analysis of superconducting thin films in a modern FIB/SEM dual-beam instrument
Microscopy and microanalysis
10.1017/S1431927621003986
- * Guo, Zimeng, Gao, Hongye, Kondo, Keisuke, et. al.
Nanoscale Texture and Microstructure in a NdFeAs(O,F)/IBAD-MgO Superconducting Thin Film with Superior Critical Current Properties
ACS applied electronic materials
10.1021/acsaelm.1c00364
- * Hohe, Jörg, Schober, Michael, Fliegener, Sascha, et. al.
Effect of cryogenic environments on failure of carbon fiber reinforced composites
Composites Science and Technology
10.1016/j.compscitech.2021.108850
- * Hornung, Frank, Decker, Marcel, Eisele, Matthias, et. al.
Achievement of 26.5 T at 1.8 K and 24.0 T at 4.4 K in a Free Bore of 68 mm Diameter: Successful Commissioning of the HOMER II LTS/HTS High Field Facility Upgrade
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3080077
- * Iida, Kazumasa, Hänisch, Jens, Kondo, Keisuke, et. al.
High J_c and low anisotropy of hydrogen doped NdFeAsO superconducting thin film
Scientific Reports
10.1038/s41598-021-85216-3
- * Kolb-Bond, D., Bird, M., Dixon, I. R., et. al.
Screening current rotation effects: SCIF and strain in REBCO magnets
Superconductor Science and Technology
10.1088/1361-6668/ac1525
- * Liu, Y., Grilli, F., Cao, J., et. al.
An electromagnetic design of a fully superconducting generator for wind application
Energies
10.3390/en14227811
- * Noe, Mathias, Kottonau, Dustin
Wirtschaftlichkeit und Systemintegration von supraleitenden 380 kV Höchstspannungskabeln [Economic efficiency and system integration of superconducting 380 kV extra high voltage cables]
Automatisierungstechnik
10.1515/auto-2021-0017
- * Rijckaert, Hannes, Cayado, Pablo, Hänisch, Jens, et. al.
Unravelling the Crystallization Process in Solution-Derived $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ Nanocomposite Films with Preformed ZrO_2 Nanocrystals via Definitive Screening Design
The journal of physical chemistry letters
10.1021/acs.jpcllett.1c00135
- * Riva, Nicolò, Grilli, Francesco, Dutoit, Bertrand
Superconductors for power applications: An executable and web application to learn about resistive fault current limiters
European Journal of Physics
10.1088/1361-6404/abf0da
- * Riva, Nicolo, Grilli, Francesco, Sirois, Frederic, et. al.
Optimization Method for Extracting Stabilizer Geometry and Properties of REBCO Tapes
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3063079
- * Riva, N, Sirois, F, Lacroix, C, et. al.
A wide range E–J constitutive law for simulating REBCO tapes above their critical current
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/ac2883
- * Sander, A., Orfila, G., Sanchez-Manzano, D., et. al.
Superconducting imprint of magnetic textures in ferromagnets with perpendicular magnetic anisotropy
Scientific reports
10.1038/s41598-021-99963-w
- * Schreiner, Fabian, Liu, Yingzhen, Noe, Mathias
Investigation of a six pole stator system using no-insulation 2nd generation high temperature superconductor for a 10 kW generator demonstrator
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3064513
- * Vargas-Llanos, Carlos Roberto, Lengsfeld, Sebastian, Noe, Mathias, et. al.
Influence of Coil Position on AC Losses of Stator Superconducting Windings of a Synchronous Machine for a 10 MW Wind Turbine
IEEE Transactions on Applied Superconductivity
10.1109/TASC.2021.3104983
- * Wolf, Michael Johannes, Fietz, Walter H., Heiduk, Mathias, et. al.
Current Redistribution in a Superconducting Multi-Strand 35 kA DC Cable Demonstrator
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2021.3063071

* Yan, Yufan, Qu, Timing, Grilli, Francesco“
Numerical Modeling of AC Loss in HTS
Coated Conductors and Roebel Cable
Using T-A Formulation and Comparison
with H Formulation
IEEE Access
10.1109/ACCESS.2021.3067037

* Zhang, Hongye, Wen, Zezhao, Grilli,
Francesco, et. al.
Alternating Current Loss of Superconduc-
tors Applied to Superconducting Electrical
Machines
Energies
10.3390/en14082234

* La Rosa Betancourt, Manuel, Collier-
Wright, Marcus, Bögel, Elias, et. al.
Magnetohydrodynamic Enhanced Entry
System for Space Transportation (MEESST)
as a Key Building Block for Future Explora-
tion Missions
Journal of the British Interplanetary Society

* Batista de Sousa, Wesley Tiago,
Shabagin, Eugen, Kottonau, Dustin, et. al.
An open-source 2D finite difference based
transient electro-thermal simulation model
for three-phase concentric superconduc-
ting power cables
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abc2b0

* Grünewald, Lukas, Langer, Marco,
Meyer, Sven, et. al.
Structural and chemical properties of su-
perconducting Co-doped BaFe₂As₂ thin
films grown on CaF₂
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abcecf

* Iida, Kazumasa, Cayado, Pablo, Rijckaert,
Hannes, et. al.
Pinning analyses of a BaHfO₃-containing
GdBa₂Cu₃O_{7-d} thin film grown by chemical
solution deposition
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abb205

* Musso, A., Breschi, M., Ribani, P. L.,
et. al.
Analysis of AC loss contributions from dif-
ferent layers of HTS tapes using the A – V
formulation model
IEEE transactions on applied superconduc-
tivity
10.1109/TASC.2020.3033587

* Troshyn, Oleksiy, Hoffmann, Christian,
Große, Veit, et. al.
La_{1-x}Mn_{1-y}O_{3±δ} buffer layers on inclined
substrate deposited MgO templates for
coated conductors
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abd5f2

Proceedingsbeitrag

* Grilli, Francesco, Abraham, Sunny,
Brambilla, Roberto
AC loss calculation in high-temperature
superconductor wires and windings with
analytical and numerical models: Influence
of J_c(B) dependence
33rd International Symposium on
Superconductivity (ISS2020), 1-3 December
2020, Tsukuba, Japan
10.1088/1742-6596/1975/1/012038

* Riva, Nicolò, Grilli, Francesco, Dutoit,
Bertrand“
AURORA: A public applications server to
introduce students to superconductivity
7th edition of the International Workshop
on Numerical Modelling of High Tempera-
ture Superconductors, 22-23 June 2021,
Virtual (Nancy, France). Ed.: K. Berger
10.1088/1742-6596/2043/1/012005

Buchbeitrag

J. Hänisch, S.C. Wimbush
High-Temperature Superconductors, in: J.
Rumble (ed), CRC Handbook of Chemistry
and Physics, 102nd edition, CRC Press,
2021

Veröffentlichungen

Programm Energiesystemdesign (ESD)

(* WoS und/oder Scopus referiert)

* Batista de Sousa, Wesley Tiago, Shabagin, Eugen, Kottonau, Dustin, et. al.
An open-source 2D finite difference based transient electro-thermal simulation model for three-phase concentric superconducting power cables
Superconductor science and technology
10.1088/1361-6668/abc2b0

* Musso, A., Breschi, M., Ribani, P. L., et. al.
Analysis of AC loss contributions from different layers of HTS tapes using the $A - V$ formulation model
IEEE transactions on applied superconductivity
10.1109/TASC.2020.3033587

Veröffentlichungen

Eingeladene Vorträge

Tabea Arndt

- Tabea Arndt, Ressourcen und Energieeffizienz für die Energiewende, Online-Perspektiv-Tag „Karriere im Energiesektor“ von Jugend forscht, Virtuell, 02.03.2021
- Tabea Arndt, (High) Magnetic fields by superconductors – from an early promise to present devices and new options, Summer School Harbin Institute of Technology, CN, virtuell, 16.07.2021
- Tabea Arndt, Mathias Noe, Plenary talk: Superconductivity for Green Energy, EUCAS 2021, 05.–09.09.2021, Moscow, RU, Moskau, virtuell, 06.09.2021
- Tabea Arndt, Wasserstofftechnologie und Fahrzeuge, FVEE Jahrestagung 2021, Berlin, 11.11.2021
- Tabea Arndt, Electric machines based on HTS – selected aspects and recent developments, ISS 2021, JP, Fukuoka (teilvirtuell), 01.12.2021

Katharina Battes

- Katharina Battes, Current design status and outgassing considerations for the vacuum system of the Einstein Telescope, Virtual DPG Meeting, 27 Sept – 1 Okt. 2021
- Katharina Battes, Overview of the Outgassing Behavior of Metals, Polymers and Ceramics, Annual Symposium of the American Vacuum Society, Virtuell, 25–28. Okt. 2021
- Katharina Battes, Outgassing considerations for the cryogenic vacuum system of the Einstein Telescope, European Vacuum Conference, Marseille, France, 21–26 Nov 2021

Christian Day

- Christian Day, More loops, less inventory – a smart three-loop architecture for the fuel cycle of a fusion power plant, Plasma Seminar at MIT, 21 September 2021
- Christian Day, Vacuum Technology for Fusion Research, Annual Symposium of the American Vacuum Society, Virtuell, 25–28. Okt. 2021

Volker Hauer

- Volker Hauer, IFMIF-DONES gas flow modelling using Test Particle Monte-Carlo Simulations, Virtual DPG Meeting, 27 Sept – 1 Okt. 2021

Jens Hänisch

- Growth, microstructure and pinning properties of CSD REBCO films and nanocomposites, CEC-ICMC, Virtuell, 19. Juli 2021

Christos Tantos

- Christos Tantos, Deterministic modeling of neutral gas flows of tokamak nuclear fusion devices, Virtual DPG Meeting, 27 Sept – 1 Okt. 2021

Tim Teichmann

- Tim Teichmann, Stochastic Simulation of Mercury Diffusion Pumps Using Direct Simulation Monte Carlo, Virtual DPG Meeting, 27 Sept – 1 Okt. 2021

Stylianos Varoutis

- Stylianos Varoutis, Deterministic and stochastic numerical approaches in Rarefied Gas Dynamics, Virtual DPG Meeting, 27 Sept – 1 Okt. 2021

Veröffentlichungen

Schutzrechtsbestände

* Neue Schutzrechtsanmeldungen in 2021; ** Schutzrechtserteilungen mit Wirkung für Deutschland in 2021

- Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine LTS- und eine gekapselte HTS-Sektion umfasst
Kläser, Marion
US 8255023
- Kryostat mit einem Magnetspulensystem, das eine unterkühlte LTS- u. eine in einem separaten Heliumtank angeordnete HTS-Sektion umfasst
Schneider, Theo
US 8255022
- Vorrichtung zur Strombegrenzung mit einer veränderbaren Spulenimpedanz
Noe, Mathias; Schacherer, Christian
DE 2532016
FR 2532016
GB 2532016
JP 5907894
US 9583258
- Isolierter Hochtemperatur-Bandsupraleiter und Verfahren zu seiner Herstellung
Brand, Jörg; Elschner, Steffen; Fink, Stefan; Goldacker, Wilfried; Kudymow, Andrej
AT 2729969
CH 2729969
DE 2729969
FR 2729969
GB 2729969
IT 2729969
KR 10192955
US 939840
- Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Wiederaufbereitung von Abgas eines Fusionsreaktors
Day, Christian; Giegerich, Thomas
CN 105706175
DE 3061098
FR 3061098
GB 3061098
KR 1020167007345
- Design of Superconducting Devices By Optimization Of The Superconductor's Local Critical Current
Holzapfel, Bernhard; Rodriguez Zermeno, Victor
DE 2983218
US 10153071
- Schienengebundene Magnetschwebbahn
Holzapfel, Bernhard; Noe, Mathias
CN 2016800101353
DE 3256359
DE 102015001746.2
FR 3256359
US 10604898
- Transformator, Wickelkörper dafür und Verfahren zur Herstellung eines Wickelkörpers
Hellmann, Sebastian
DE 3341945
FR 3341945
GB 3341945
- Supraleitfähiger Leiter und Verwendung des supraleitfähigen Leiters
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.
CN 10814458
DE 102015010636.8
EP 16757151.2
US 10825585
- Verbinder für supraleitfähige Leiter und Verwendung des Verbinders
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.
CH 3335280
CN 10814961
DE 3335280
DE 102015010634.1
FR 3335280
GB 3335280
IE 3335280
US 10218090
- Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines supraleitfähigen Leiters
Fietz, Walter; Heller, Reinhard; Weiss, Klaus-Peter; Wolf, Michael J.
CN 201680059670.8
DE 102015010676.7
EP 16756943.3-1212
US 15/752,224
- Design of contacts for superconducting busbars and cables
Rodriguez Zermeno, Victor
DE 3352303
FR 3352303
GB 3352303

- Verfahren und Vorrichtung zur Anreicherung oder Abreicherung mindestens eines Wasserstoffisotops in einem Gasstrom
Day, Christian; Giegerich, Thomas; Hörsensmeyer, Yannik; Müller, Ralf; Peters, Benedikt
DE 3441129
GB 3441129
- Stromschiensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen
Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin
DE 202017102659
- Stromschiensystemelement mit einem Supraleiterstrand und einem Verbindungsstück sowie Stromschiene mit einer Vielzahl von solchen Elementen
Kudymow, Andrej; Rodriguez Zermeno, Victor; Strauß, Severin
EP 18720292.4
- Bitterprinzipbasierte Magnetvorrichtung und Verwendung einer bitterprinzipbasierten Magnetvorrichtung
Arndt, Tabea
DE 102020124852.0
- Bandleitervorrichtung und Kabel, das die Bandleitervorrichtung aufweist
Arndt, Tabea
DE 102020128417.9
- Hochtemperatur-Supraleitende Schaltelemente für Umrichter- und Gleichrichterschaltungen
Martz, Simon; Noe, Mathias; Pham, Quoc Hung
DE

Kontakt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Technische Physik
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon: +49 721/608-Durchwahl
E-Mail: vorname.nachname@kit.edu

www.itep.kit.edu

Leitung

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)
Prof. Dr. Tabea Arndt (-23515)

Sekretariat

Dagmar Klimmek (-23501)

Kryobetrieb

Dr. Holger Neumann (-22625)

Vakuumtechnik

Dr. Christian Day (-22609)

Geschäftsführer

Kai Bauer (-23705)

Supraleitermaterialentwicklung und energietechnische Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe (-23500)
Prof. Dr. Bernhard Holzapfel (-26000)